

三相鼠笼式单绕组多速电动机

濮绍文 濮少文 编著

三相鼠笼式单绕组多速电动机

（原理和改绕计算）

濮绍文　濮少文

上海人民出版社出版
（上海绍兴路5号）
新华书店上海发行所发行　上海商务印刷厂印刷
开本 787×1092 1/32　印张 12.375　字数 272,000
1976年1月第1版　1976年1月第1次印刷
统一书号：15171·185　　定价：0.76元

毛主席语录

列宁为什么说对资产阶级专政，这个问题要搞清楚。这个问题不搞清楚，就会变修正主义。要使全国知道。

人类的历史，就是一个不断地从必然王国向自由王国发展的历史。这个历史永远不会完结。在有阶级存在的社会内，阶级斗争不会完结。在无阶级存在的社会内，新与旧、正确与错误之间的斗争永远不会完结。在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

前　　言

单绕组多速异步电动机是一种只有一套定子绕组，通过外部接线的变换获得多种转速的电动机。它属于有级调速设备，具有简单可靠、易于绕制的优点，可以用于机床、轧钢、起重、制革、制糖、纺织等工业中的变速拖动。

在工厂，尤其是中、小型工厂的生产实践中，往往遇到需要自力更生地将一只单速异步电动机改绕成多速的情况。无产阶级文化大革命以前，叛徒刘少奇在工厂企业单位中推行了一条反革命修正主义路线，迷信"专家"，鼓吹"技术神秘论"，把工人阶级排斥在技术领域之外。伟大的无产阶级文化大革命批判了刘少奇和林彪的反革命修正主义路线，从而解放了我们工人在技术领域中的无穷潜力。为了解决单速异步电动机(鼠笼式)改绕多速的生产实践问题，在无产阶级文化大革命伟大胜利鼓舞下，在批林批孔运动的推动下，我们在厂党组织的支持下狠批了林彪和孔老二鼓吹的"上智下愚"反动谬论，按照伟大领袖毛主席关于"**一个正确的认识，往往需要经过由物质到精神，由精神到物质，即由实践到认识，由认识到实践这样多次的反复，才能够完成**"的教导，大胆实践，认真总结，通过几年的摸索获得了一些体会。本书即是我们在这方面学习和实践的总结。

单速异步电动机改绕多速的工艺和一般电动机的绕制工艺相同，因此本书叙述只限于改绕原理和计算方法。

本书编写过程中曾得到上海市卢湾区业余工业专科学

校、虹口区科技交流站、上海跃进电机厂、上海电器科学研究所等单位和很多同志的大力帮助，在此一并致谢。

由于我们思想及技术水平有限，书中错误缺点在所难免，请读者大力批评指正。

作　　者

1974年9月

目　录

前　言
第一章　电工基本知识……1
第一节　交流电的基本知识……1
第二节　磁的基本知识……6
第三节　电磁感应定律……8
第二章　鼠笼式三相异步电动机基本运行原理……10
第一节　三相旋转磁场的产生……10
第二节　转矩的产生及其大小……12
第三节　异步电动机的转矩-转速曲线……14
第三章　定子绕组……16
第一节　绕组构造和绕组图……16
第二节　槽电势矢量图及用槽电势矢量图排列绕组的方法……18
第三节　分布系数、短距系数和绕组系数……24
第四节　槽电流表和绕组磁势图……31
第四章　变极调速的原理和方法……36
第一节　变极调速原理……36
第二节　反向变极法的原理和绕组排列……37
第三节　反向变极法的接线方法……70
第四节　换相变极法……83
第五节　不同跨距变极法……97
第五章　单绕组多速电动机的性能特点……101
第一节　电势公式……102
第二节　单绕组多速电动机的转矩特性和功率特性……104

第三节 特性分析举例……106
第六章 单绕组多速电动机的改绕步骤和计算……112
第一节 改绕步骤……112
第二节 改绕计算公式和方法……118
第三节 改绕实例……130
第七章 单绕组多速电动机的控制……159
第一节 双速电动机的控制……159
第二节 三速电动机的控制……174
第八章 谐波磁场的影响及其克服方法……191
第一节 谐波磁场的产生……192
第二节 不同绕组的谐波磁场……198
第三节 谐波磁场对电动机性能的影响……209
第四节 谐波磁场影响的克服方法……230
第五节 判断和克服谐波磁场影响的措施……242
第九章 单绕组多速电动机绕组方案……245
本书符号表……340
附录 I 国产多速电动机技术数据表……342
附录 II 常用线规……368
附录 III 三角函数正弦余弦表……383

第一章　电工基本知识

毛主席教导我们，人们对于自然界的认识是“**一步又一步地由低级向高级发展，即由浅入深，由片面到更多的方面**”。为了阐明本书的主题——鼠笼式单速三相异步电动机改绕多速（单绕组）的原理和计算，在开头两章我们将回顾一下有关的基本知识——交流电和磁的基本知识以及鼠笼式三相异步电动机的基本运行原理。

第一节　交流电的基本知识

1. 什么是交流电

我们知道，电有“直流”和“交流”两大类，方向恒定不变的叫作直流，方向和大小周期性地变化的叫作交流。工厂中的动力用电和一般照明用电都是交流电，它的波形见图 1-1。由图可知，它的大小和方向是随时间 t 变化的，设 t_0 时为零，t_1

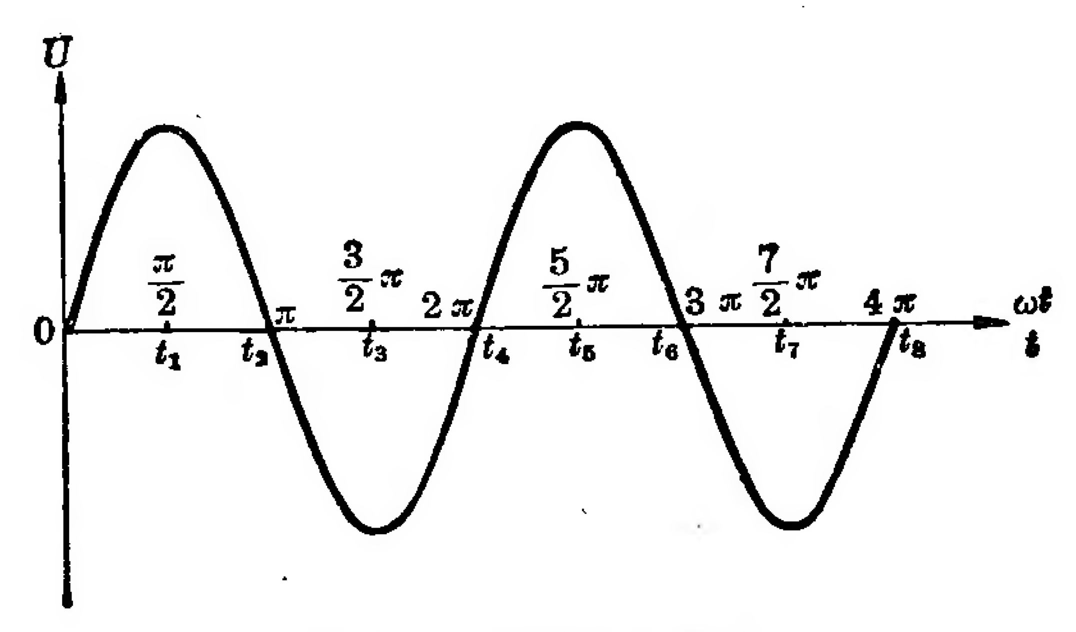


图 1-1　交流电的波形

时上升到最大值，t_2 时下降为零；其后方向变负，t_3 时上升到负的最大值，t_4 时又回到零；从 t_0 到 t_4，正好变化一周。t_4 以后不断重复上述过程。

交流电的这种波形和三角学中的正弦(sin)曲线一样，所以常叫作“正弦波”。

图 1-1 中横坐标除用来表示时间 t 之外，还常用来表示电角度 (ωt)，交流电变化一周的时间相当于 $2\pi(360°)$ 电角度，半周即为 $\pi(180°)$电角度，余类推。

2. 交流电的主要参数

任何运动形式，其内部都具有区别于他事物的特殊的本质。交流电这种运动形式也如此，它的特殊的本质可以用所谓“参数”来描述。交流电的主要参数有：振幅、平均值、有效值、周期、频率和初相角(位)。

(1) 振幅、平均值和有效值

交流电变化所达到的最大值称为“振幅”。电流、电压等的振幅，一般在其代表符号右下角加上角标“m”来表示，例如 I_m、U_m 等。

平均值系对半周而言，在代表符号右下角加角标“a”来表示，如图 1-2 中的 U_a。从面积上看，四边形 $0abc$ 和半周

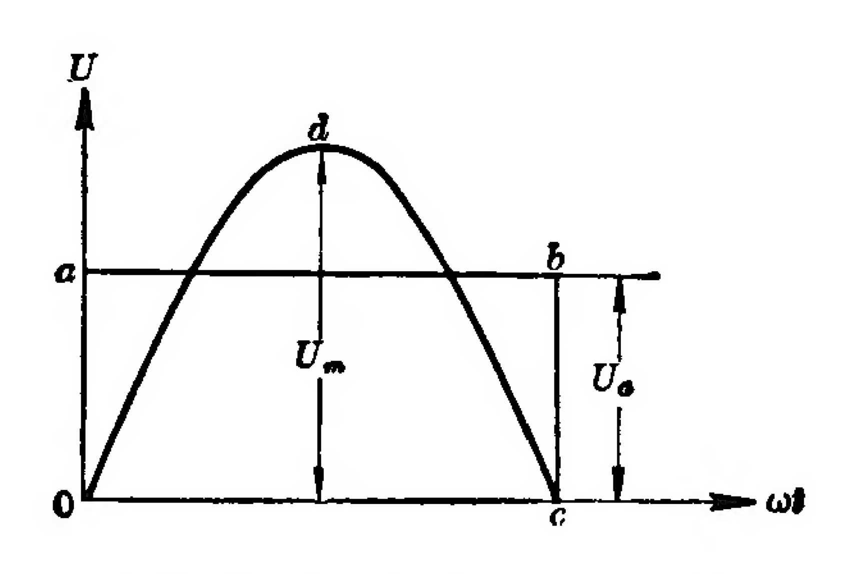


图 1-2 交流电平均值的图示

$0dc$ 面积正好相等。

有效值是等效于某一直流而言的。一个交流电通过一个电阻，如果单位时间内，它所产生的热量和某一直流电通过同一电阻所产生的热量相等（即它们的热效应相等），这个直流电的数值就是交流电的有效值。电流、电压等一般代表符号 I、U，凡右下角不加角标的都代表有效值。

振幅、平均值、有效值是从不同角度表示交流电大小的三个参数，其中有效值用得最多。一般情况下交流电的数值不加特别说明时都指有效值，例如照明用的 220 伏，动力用的 380 伏等都是。振幅、平均值、有效值三者之间在数量上有一定关系，对于正弦波根据数学计算有：

$$U_a=\frac{2}{\pi}U_m=0.637U_m$$

$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}=0.707U_m$$

$$U=\frac{\pi}{2\sqrt{2}}U_a=1.11U_a$$

(2) 周期和频率

周期和频率是用来表示交流电变化快慢的两个参数。周期（符号 T）是交流电变化一周所需的时间。频率（符号 f）是一秒钟内交流电完成周期变化的次数。周期和频率两者互为倒数：$f=\frac{1}{T}$。我国工业用交流电标准频率是 50 赫芝，周期为 0.02 秒。

(3) 初相角（位）与相位差

交流电的特征除了大小和变化快慢之外，还有很重要的一个方面——初相角（位）。图 1-3 画出了异步电动机普遍用的三相交流电波形。图中 i_a、i_b、i_c 三个交流电它们的振幅和

频率相同，但是它们到达幅值或某一规定值的电角度不同，所以三者是有区别的。为了表示这个区别就要用到初相角(位)这个参数。前面提到的交流电的电角度，实际上就是交流电的相位角，简称相位。$t=0$ 时的相角(位)就叫作交流电的初相角(位)。交流电之间初相角(位)之差就叫作交流电的相位差。用这个概念来比较图 1-3 中的交流电 i_a、i_b、i_c，就知道它们之间的区别仅在于依次有$\frac{2\pi}{3}$ (120°) 的相位差，i_c 超前于 i_a，i_a 超前于 i_b。

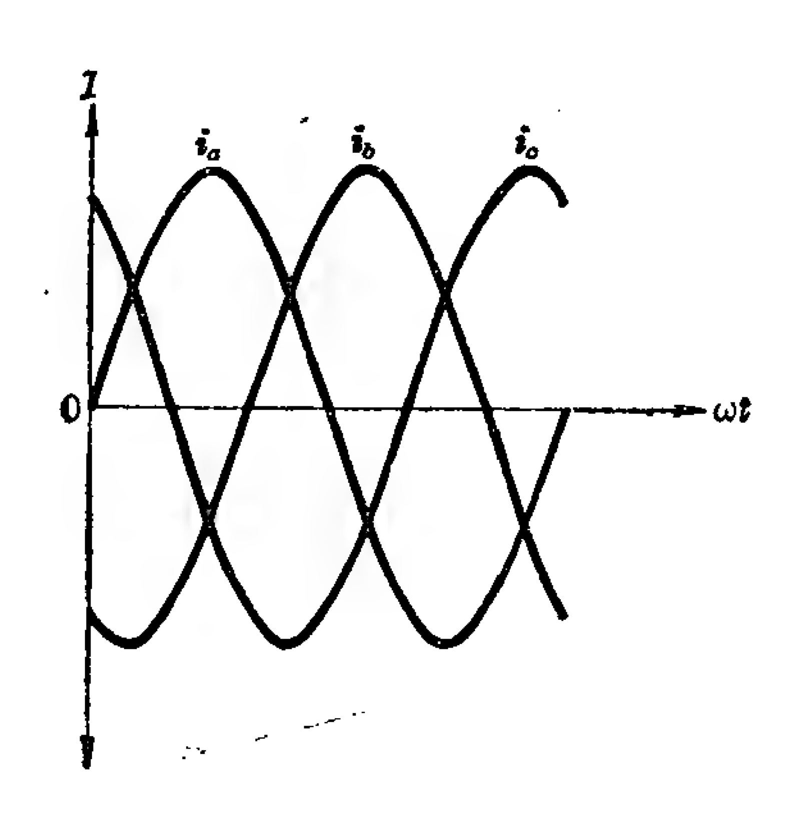


图 1-3　三相交流电波形

3. 交流电的矢量图示法

交流电既具有一定数量，又具有一定的初相角(位)，这种情况和物理学中的"力"既具有一定大小，又具有一定方向相似。我们把这种量叫作"矢量"，可形象地画一根带箭头的直线来表示。在交流电中，通常以直线的长短表示它的振幅，以箭头的方向表示它的初相角(位)。

在同时画几个具有不同初相角(位)的交流电矢量时，通

常以某一个矢量为基准（0°），规定反时针旋转为超前，顺时针旋转为滞后。

图 1-4 即是图 1-3 三个交流电的矢量图。由图可清楚地看出三者的相位依次相差 120°。

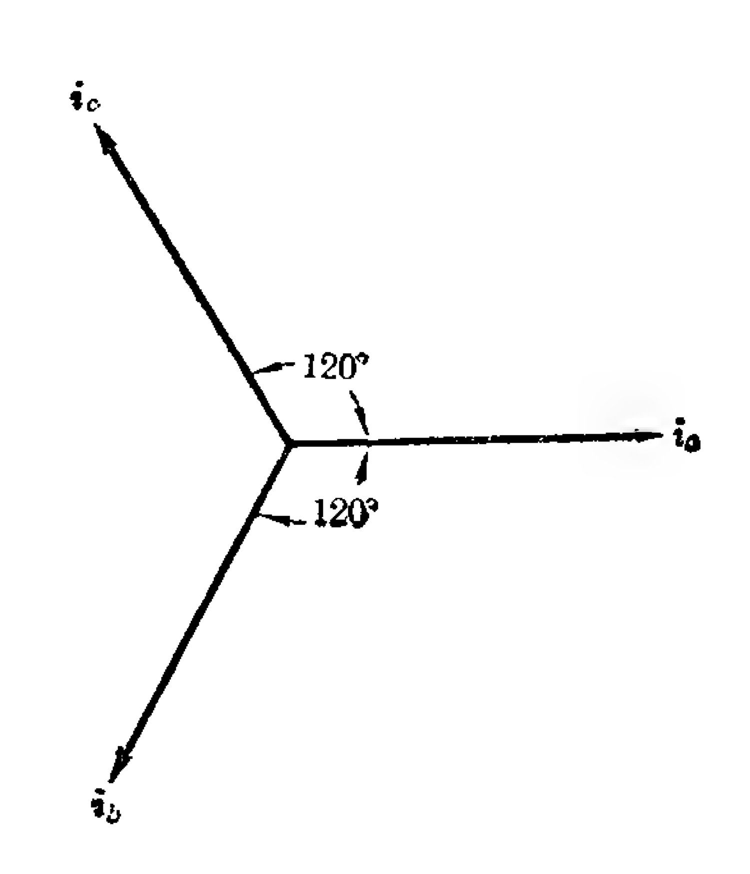


图 1-4　三相交流电的矢量图

4．三相交流电路

图 1-3 已画出了三相交流电的波形，并介绍了它的特点是三个交流电的振幅和频率相等，仅相位依次相差 120°。

工业用电力电源都是三相交流电。异步电动机接在三相电网上，其基本接法通常有Y和△两种，如图 1-5 所示。图中 A、B、C 表示电源的三个相号。任意两根电源线之间的电压叫作“线电压”，流过任意一根电源线的电流叫作“线电流”。对于异步电动机来说，每个相绕组两端的电压叫作“相电压”，通过每个相绕组的电流叫作“相电流”。对照图 1-5 可明显看出，在Y接法中相电流就等于线电流，相电压则小于线电压；对于三相对称电路（异步电动机三相总是对称的）可证明Y接法

时 $U_{线}=\sqrt{3}U_{相}$; 在△接法中相电压就等于线电压，而相电流则为线电流的 $\frac{1}{\sqrt{3}}$。

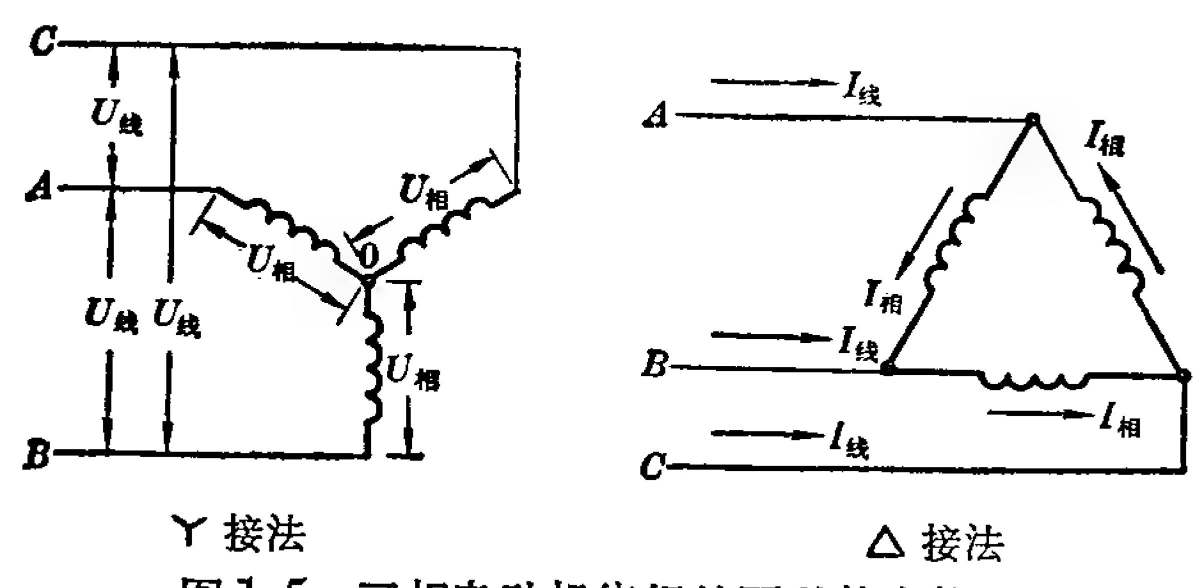


图 1-5　三相电动机绕组的两种基本接法

异步电动机铭牌上所标的额定电压和额定电流都指的是线电压和线电流的有效值。当电动机以Y接法接在线电压为380伏的三相电网时，其相电压正好是220伏；△接法时相电压则为380伏。

第二节　磁的基本知识

1. 磁场和磁力线

“磁场”这个概念对电工来说是比较熟悉的。大家知道，一个线圈如果通上电流，线圈的周围就会产生磁场；磁场的存在可以用磁力线来表示。磁力线是有方向的，通常规定，在磁体的外部，磁力线的方向是从北极指向南极；在磁体内部则从南极指向北极。

导线中通以电流，周围就产生磁场，如果导线中电流的方向一定，那末磁力线方向也就一定，这可以用下述方法来判定：以右手握住导线，拇指指向电流方向，其余四指就是指的磁力线方向，见图 1-6。

2. 磁通量和磁通密度

在磁场内任意取定一块面积，该面积内必有一定数量的磁力线通过；垂直通过这块面积的磁力线总数就叫作这块面积的“磁通量”。

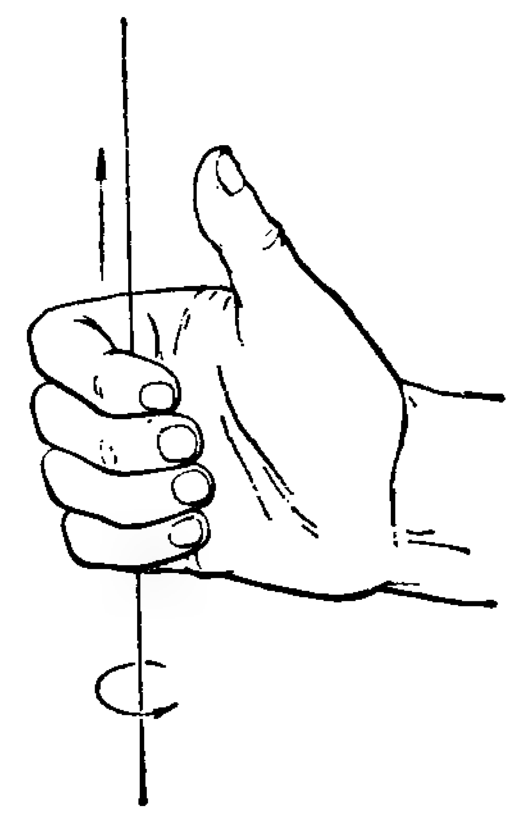


图1-6 磁力线方向与电流方向的关系

磁通量用符号 Φ 表示。它的单位是“韦伯”或“麦克斯韦”，1韦伯$=10^8$麦克斯韦。

单位面积的磁通量叫作“磁通密度”(也叫作“磁感应强度”)，用符号 B 表示。很明显，B 和 Φ 之间有如下关系：

$$B=\frac{\Phi}{S}$$

式中 S 表示面积。

磁通密度的常用单位是“高斯”。

$$1\text{高斯}=\frac{1\text{麦克斯韦}}{\text{厘米}^2}$$

磁通密度的大小实际上反映了磁场的强弱。磁场内某一处磁通密度愈大，也就是该处磁力线分布愈密，则磁场愈强。在异步电动机中，磁通密度沿气隙圆周的分布基本上是正弦形。因此，象交流电一样，它也有最大值、平均值和有效值的区分。

3. 磁动势

磁动势简称磁势，用符号 F 表示，它和电学中的电动势相似。大家知道，电动势可以理解为电路中产生电流的原动力，磁动势则可以理解为磁路中产生磁通的原动力。

一只线圈通上电流，它就产生磁势。在磁势的作用下，磁路中产生一定的磁通。电工学中证明：通电线圈产生的磁势，其数量等于线圈中电流 I 与线圈匝数 w 的乘积。即

$$F=Iw$$

磁势的常用单位是“安匝”。

4．*磁场对电流的作用*

把通电导线放在磁场之中，导线会受到一定的作用力而发生运动，这是磁场对导线中电流发生作用的结果。

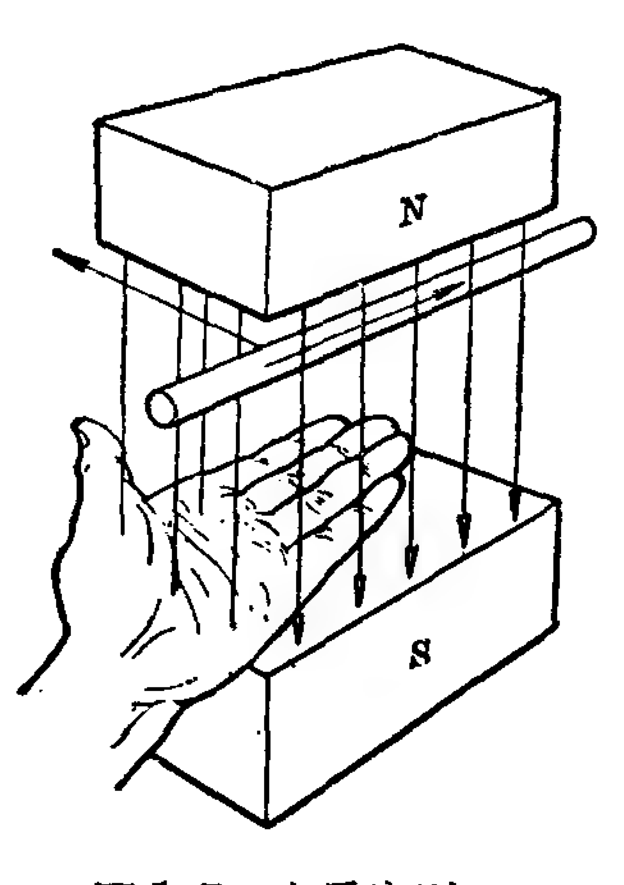


图 1-7　左手定则

电动机的基本工作原理就是利用磁场对电流的作用。电动机转子所以能够转动就是因为电机气隙中的磁场和转子电流相互作用的结果。

电工学中证明，通电导线在磁场中受到的作用力，与导线中的电流、导线长度以及该处磁通密度成正比。作用力的方向可用左手定则来判定：伸开左手，如图 1-7，手心正对磁力线方向，四指指向电流方向，拇指所指的就是作用力的方向。

第三节　电磁感应定律

导线切割磁力线，导线上就有感应电动势，这是大家都熟悉的电磁感应现象。导线切割磁力线，实际就是指导线和磁场之间有相对运动。对于线圈来说，只要穿过线圈中的磁通量发生变化，线圈中就会产生感应电动势。如果电路接通，线圈

中就会产生感应电流。

电磁感应定律说明了由电磁感应产生的电动势的大小及其方向。对于单根导线，感应电动势与单位时间内导线切割磁力线的根数成正比；对于线圈，感应电动势与单位时间内线圈中磁通的变化量和线圈的匝数成正比。如果在时间 Δt 内，一个 w 匝的线圈，穿过线圈的磁通变化量为 $\Delta\Phi$，根据电磁感应定律，线圈的感应电动势

$$E = w\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

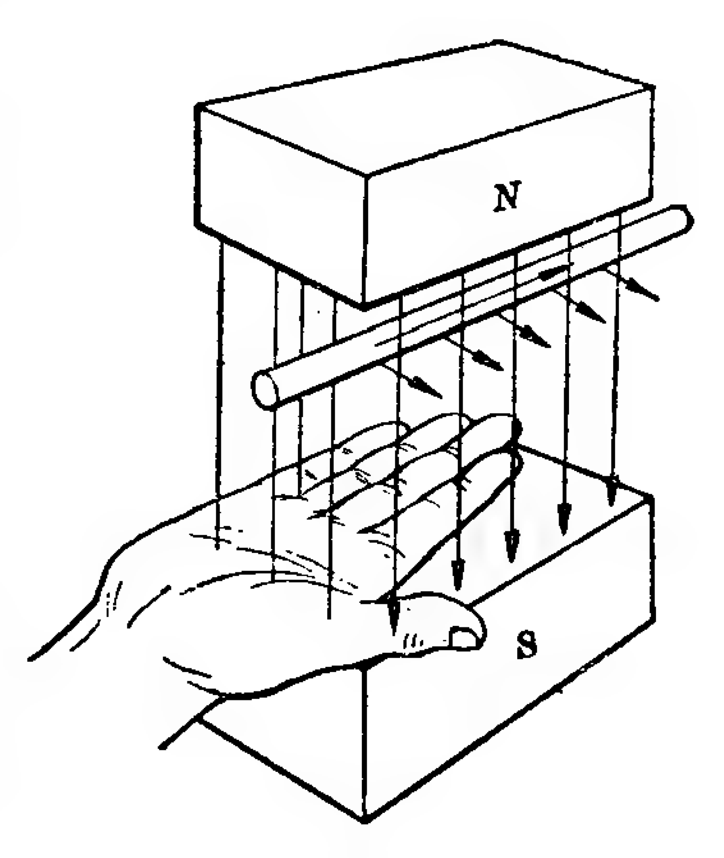


图 1-8 右手定则

由电磁感应在导线中产生的感应电流方向（也就是感应电动势方向）可用右手定则来判定：伸开右手如图 1-8，手心正对磁力线方向，拇指指向导线运动方向（或指向磁场运动的反方向），其余四指所指的就是导线中感应电动势也就是感应电流的方向。

第二章　鼠笼式三相异步电动机基本运行原理

多速异步电动机是在单速异步电动机基础上发展而来的。因此,要掌握单速异步电动机改绕多速的原理和计算,对异步电动机的基本运行原理应该先有清楚的了解。

由于本书叙述的是鼠笼式单速三相异步电动机的改绕,因此,本章也只对鼠笼式三相异步电动机的基本运行原理作必要的介绍。

第一节　三相旋转磁场的产生

三相异步电动机的定子绕组由三个独立的相绕组组成。当绕组中通以三相交流电时,电动机内部就产生旋转磁场。毛主席教导我们:“**外因是变化的条件,内因是变化的根据**”,异步电动机由静止变化到转动,它的根据就在于电动机内部旋转磁场的产生,绕组中通以三相交流电则是产生这个变化的条件。

现在我们来分析三相旋转磁场的产生原理以及它的转速和什么有关系。

图 2-1 是一只六槽两极三相异步电动机的示意图。定子绕组三个相线圈接在三相电网上,在 0、$\frac{\pi}{2}$、π、$\frac{3}{2}\pi$、2π 五个瞬间,电流情况分别是 $i_A=0$、$i_B=-\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$、$i_C=\frac{\sqrt{3}}{2}I_m$,

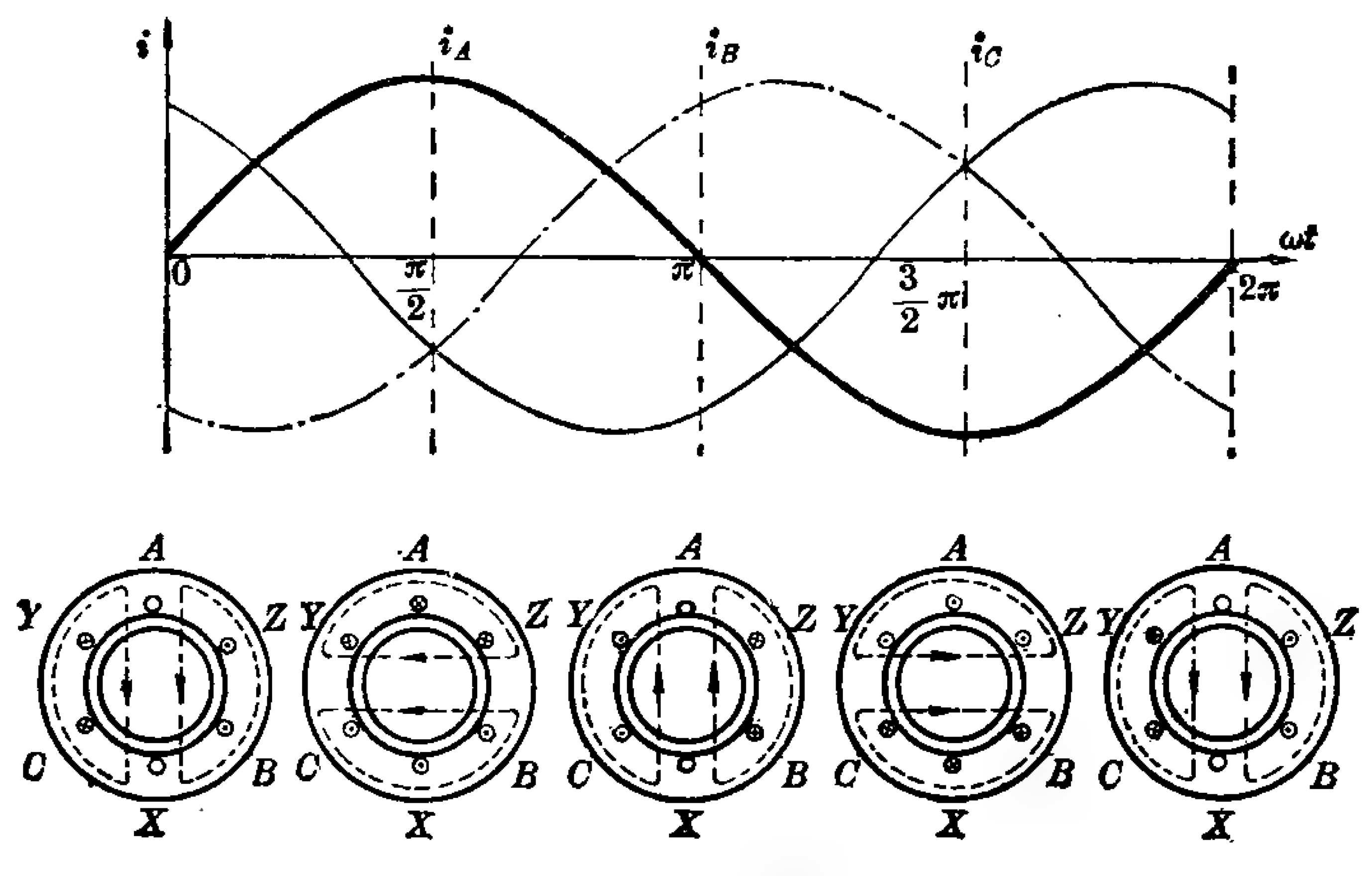


图 2-1　三相旋转磁场的形成

$i_A=I_m$、$i_B=i_C=-\dfrac{I_m}{2}$，$i_A=0$、$i_B=\dfrac{\sqrt{3}}{2}I_m$、$i_C=-\dfrac{\sqrt{3}}{2}I_m$，

$i_A=-I_m$、$i_B=i_C=\dfrac{I_m}{2}$，$i_A=0$、$i_B=-\dfrac{\sqrt{3}}{2}I_m$、$i_C=\dfrac{\sqrt{3}}{2}I_m$。

我们规定，定子每相绕组电流自"头"(A、B、C)流入为正，自"尾"(X、Y、Z)流入为负。同时以"×"号代表流入纸面方向，"•"号代表流出纸面方向。应用第一章第二节所述方法可确定三相定子绕组于 0、$\dfrac{\pi}{2}$、π、$\dfrac{3}{2}\pi$、2π 五个瞬间所产生的合成磁场方向如图 2-1 所示。由图可知，绕组中通以三相电流，电动机内部就会产生一个幅值不变的旋转磁场。这磁场沿气隙圆周基本上是按正弦波形分布的，幅值不变指的是旋转时磁场正弦波振幅不变。

由图 2-1 还可看出：电流在时间上变化半周，磁场在电机内部空间正好转过半个圆周。对于两极电机，半个圆周正好是一个极距（沿电机气隙圆周量得的相邻两极中心的距离叫

极距，以符号 τ 表示）。因此，电流变化一周，磁场正好转过2个极距；电流每秒变化 f 周，磁场每秒即转过 $2f$ 个极距。考虑到两极电机一个圆周等于2个极距，所以两极电动机旋转磁场的转速 n_1 为：

$$n_1=\frac{2f}{2}\text{〔转/秒〕}$$

或

$$n_1=\frac{120f}{2}\text{〔转/分〕}$$

从普遍情形来看，如果以 p 表示电机的极对数，则电机空间一个圆周将等于 $2p$（极数）个极距。因此旋转磁场转速 n_1 的普遍公式是：

$$n_1=\frac{120f}{2p}=\frac{60f}{p}\text{〔转/分〕}$$

通常 n_1 叫做电动机的"同步转速"。以交流电频率 $f=50$ 赫（周/秒）代入，得2、4、6、8、10极异步电动机的同步转速分别是3000、1500、1000、750、600转/分。

第二节　转矩的产生及其大小

图2-2表示一个两极旋转磁场以反时针方向转动。鼠笼转子处在磁场内，每根导条（铜或铝制成）必然会切割磁力线而产生感应电势，从而产生电流。感应电流的方向可用右手定则确定，在线 xx 方向上方的转子导条，电流方向是进入纸面（×）；下方则是穿出纸面（·）。各导条之间通过端环接通。

转子导条既然带有电流，又处于磁场中，必然要受到力的作用。力的方向可用左手定则确定，图2-2中已标出。异步电动机的转矩就是由全部转子导条所受作用力的总和产生的。这个转矩将驱使转子跟着旋转磁场按同一方向转动。由

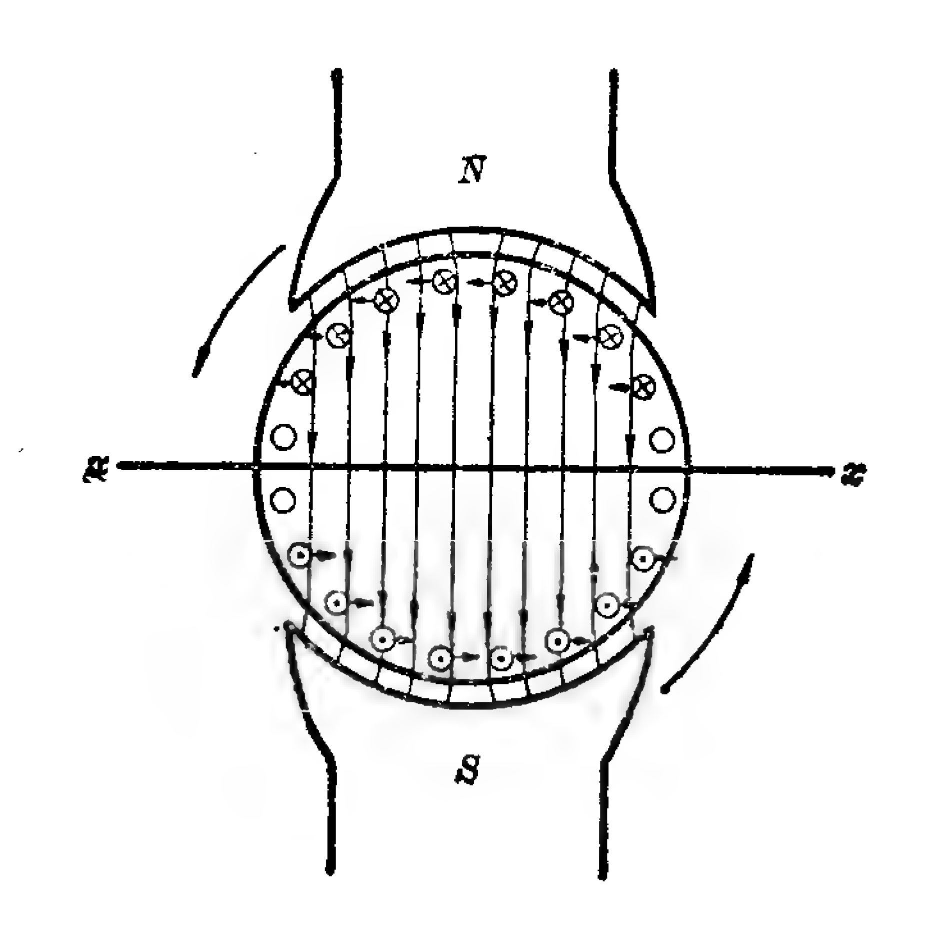


图 2-2　产生转矩的示意

于这个道理，就很容易想到，电机气隙圆周上产生的全部磁通愈大，转矩必然愈大；转子中产生力作用的全部导条电流愈大，转矩也必然愈大。

我们以M表示电动机的转矩，Φ 表示每极磁通量，m_2 表示转子绕组相数，w_2 表示转子绕组每相串联匝数，I_2 表示导条电流，K_{dy2} 表示转子绕组系数（绕组系数的含义详见第三章），则有如下关系：

$$M \equiv p\Phi m_2 w_2 I_2 K_{dy2}$$

式中 $m_2 w_2 I_2 K_{dy2}$ 为转子全部导条电流的有效安匝数。符号"$\equiv$"表示正比的意思。

实际上由于漏磁通的影响，转子电流并不能全都起力的作用。计算产生力作用的转子电流即转子电流的有功分量时应乘上一个小于 1 的因数 $\cos\varphi_2$（称为转子功率因数）。再计入比例系数$\frac{1}{\sqrt{2}}$，即得到如下关系式：

$$M=\frac{1}{\sqrt{2}}p\Phi m_2w_2K_{dy2}I_2\cos\varphi_2$$

上式中 m_2、w_2、K_{dy2} 都是转子绕组的参数。实际改绕时我们绕的是定子绕组，它也有相应的参数 m_1、w_1、K_{dy1}。由于电动机内部定、转子电流及其绕组参数在数量上有一定联系，因此可把上式中 m_2、w_2、K_{dy2} 用 m_1、w_1、K_{dy1} 代替。不过，由于代替后 $m_1w_1K_{dy1}$ 和 $m_2w_2K_{dy2}$ 数量上的不同，I_2 在数量上也要作一定变动。若以 I_2' 表示变动后的转子导条电流，我们就可以得到最后的关系式：

$$M=\frac{1}{\sqrt{2}}p\Phi m_1w_1K_{dy1}I_2'\cos\varphi_2$$

这个关系式在第五章中将用到。

第三节　异步电动机的转矩-转速曲线

异步电动机的转矩和转速有一定的关系，表示两者关系的曲线叫异步电动机的转矩-转速曲线，简称转矩曲线。实用上常以转差率 s 来间接代表转速 n，因此转矩-转速曲线也就是转矩 M 与转差率 s 之间的关系曲线，简称 M-s 曲线。

在电动机中，转子实际转速 n 一定小于旋转磁场的同步转速 n_1，如两者相等，转子导条就切割不了磁力线，转矩无从产生。转差率 s 就用来表示实际转速低于同步转速的程度。

$$s=\frac{n_1-n}{n_1}$$

$n=n_1$ 时，$s=0$。$n<n_1$ 时，$1>s>0$。起动瞬间 $n=0$，$s=1$。

图 2-3 画出了异步电动机通常的 M-s 曲线。由图可知，起动时 ($s=1$) 电机有一定转矩（叫作“起动转矩”）。随着转速 n 的增加，转差率 s 减小，转矩逐渐增大。原因是转子导条

中电流产生的漏磁通的影响随着转差率 s 的减小而减小，起力作用的电流相对增大（功率因数 $\cos\varphi_2$ 增大）。转矩升至最大值后，转速再升高（s 减小），转子导条中感应电流将明显减小，因而转矩迅速下降。转速达同步转速时（$s=0$），转矩降至零。

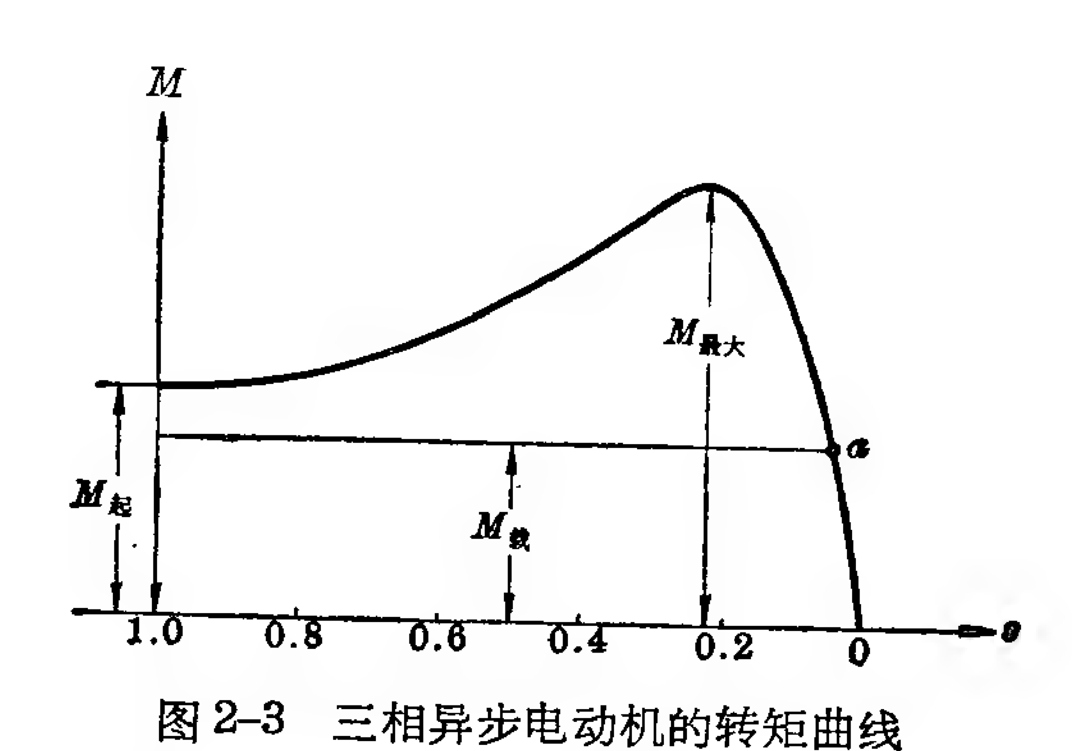


图 2-3　三相异步电动机的转矩曲线

异步电动机所带的负载，其制动转矩必须小于电动机的起动转矩，电动机才能起动。转速稳定后的转差率决定于负载转矩 $M_{载}$ 的直线与转矩曲线的交点（电动机的空载制动转矩比负载制动转矩小很多，故可忽略），如图 2-3 中的 a 点。

第三章　定子绕组

定子绕组，这是我们将单速异步电动机改绕成多速时化功夫的对象。为此，本章将专门介绍定子绕组的一些基本知识，作为以后各章的基础。

第一节　绕组构造和绕组图

定子绕组是由许多个线圈联接而成的。每个线圈（也叫作元件）都由导线绕成。元件边嵌在铁心槽内，出线头留在端部。把一相所有元件的出线头按一定规律联接起来就得到定子的一个相绕组。三相异步电动机定子共有三个相绕组，每个相绕组的联接及排列都相同，只是在空间上依次相差120°电角度。

绕组的种类有不同的划分方法：按槽内有几个元件边来划分有单层（每槽一个元件边）绕组和双层（每槽两个元件边）绕组之分；按各元件几何尺寸分，又有等元件绕组（每个元件几何尺寸都相同）和不等元件绕组（每个元件几何尺寸不等）两类；按端部联接方式又可分为迭绕组和波绕组两类；按端部形状又有同心绕组、链形绕组、篮式绕组之分。单绕组多速电动机通常都用双层迭绕组。

绕组的排列和联接可以用绕组图来表示。绕组图通常有平面展开图和圆图两种。平面展开图是假想将定子表面沿轴向剖开，并把它展开成一平面画成的。图3-1、3-2和图3-3分别画出了36槽4极电动机的单层同心式、单层迭绕式和双

层迭绕式的平面展开图，图 3-3 只画了一相的全部线圈，槽内虚线表示下层元件边，实线表示上层元件边。

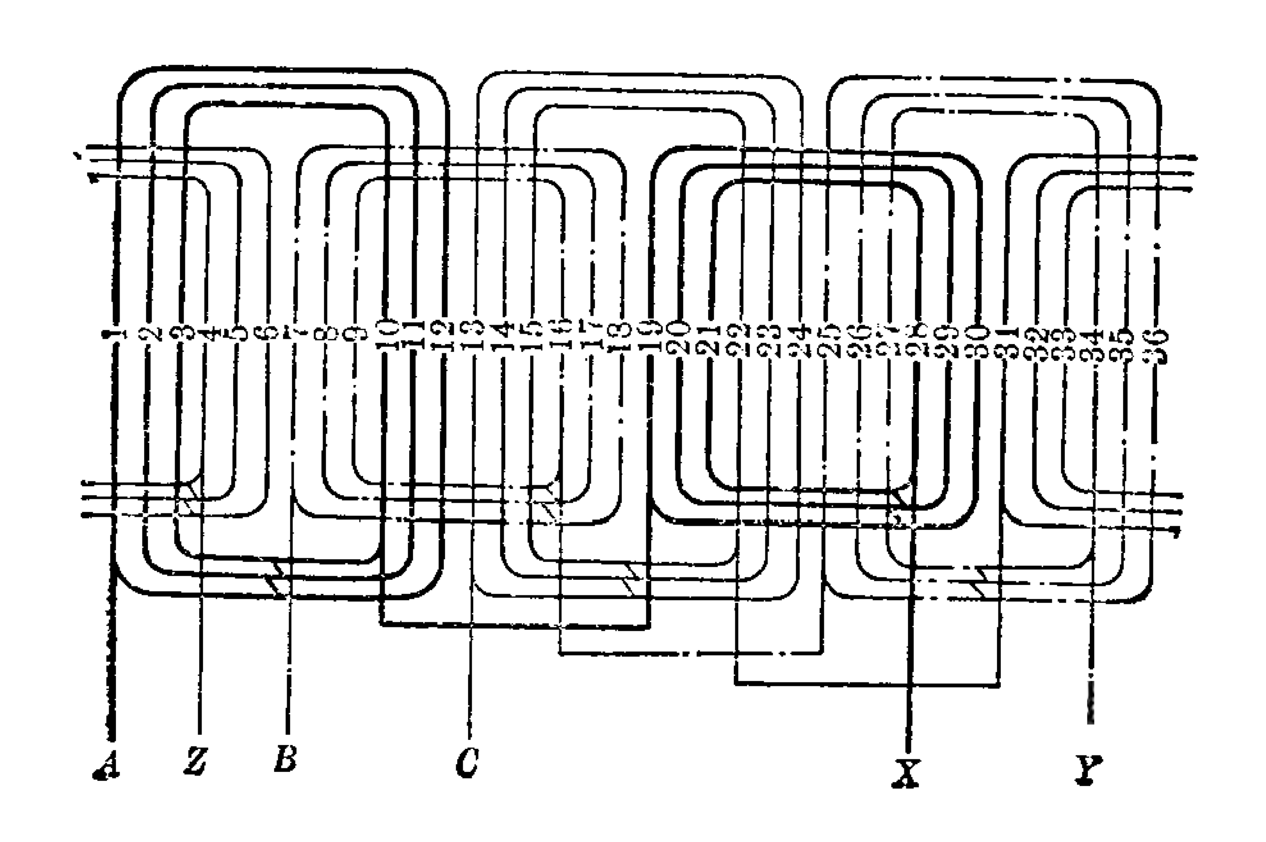


图 3-1　三相四极 36 槽同心式绕组展开图

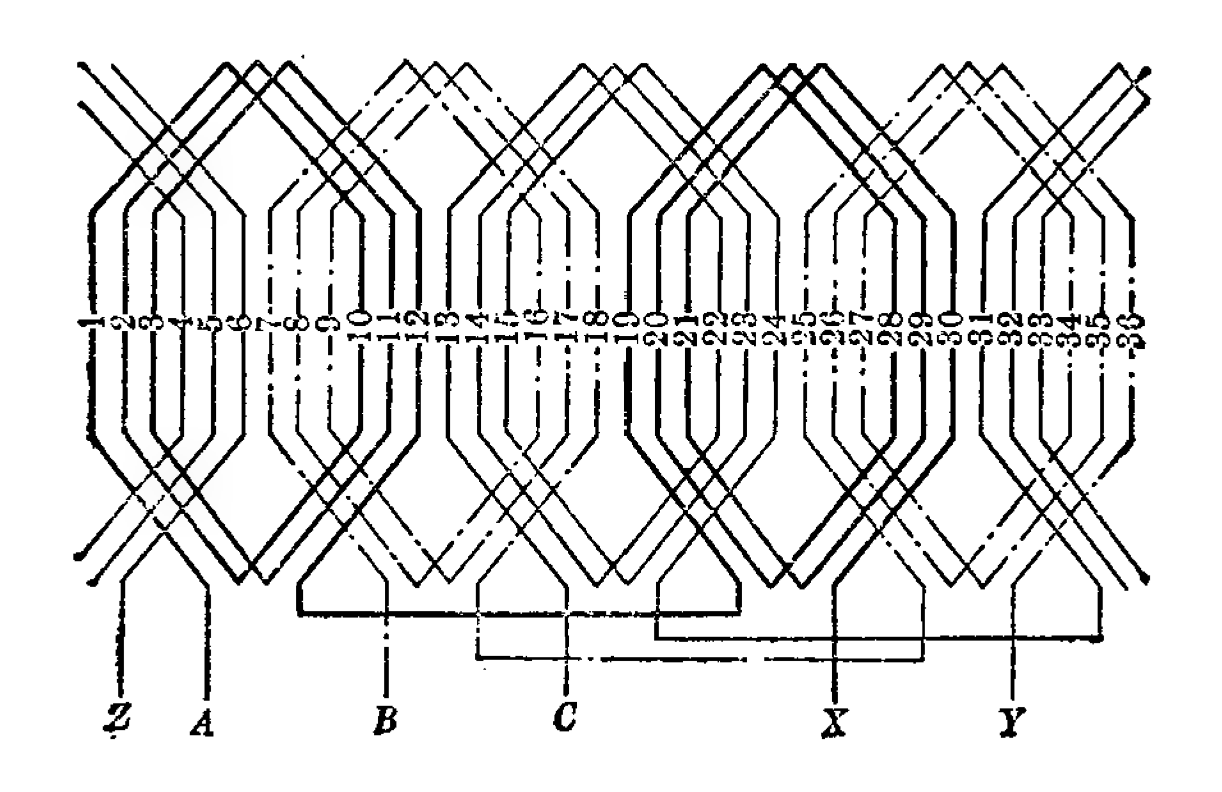


图 3-2　三相四极 36 槽单层迭绕组展开图

绕组圆图我们在以后的章节中画出。

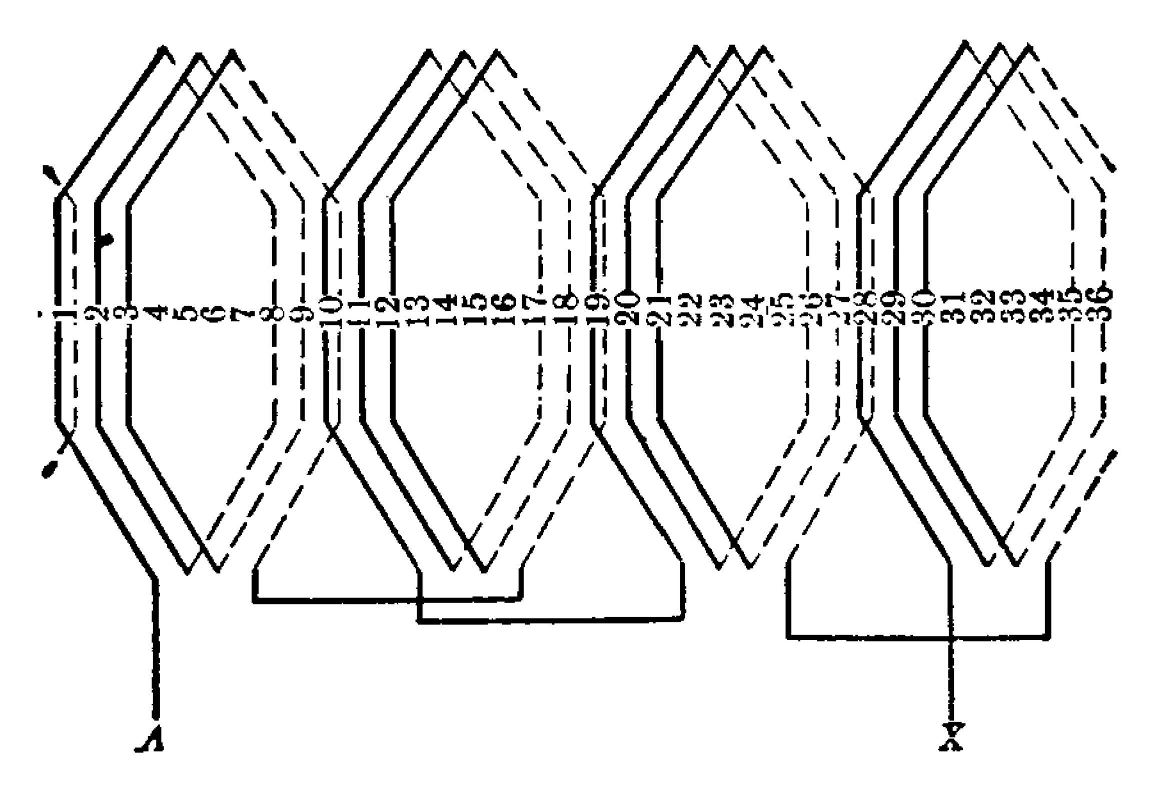


图 3-3 三相四极 36 槽双层迭绕组(一相)展开图

第二节 槽电势矢量图及用槽电势矢量图排列绕组的方法

定子绕组在槽内的排列和联接有一定的规律，这里的关键是保证三相绕组的对称：即各相绕组产生的电势大小相等，相位互差 120°。定子绕组排列和联接的规律可以在“槽电势矢量图”上体现出来，我们如果懂得了槽电势矢量图，就可以利用它来排列出所需要的绕组。用槽电势矢量图来排列绕组是本书经常用到的一个重要方法。

1. 槽电势矢量图

我们已知异步电动机定子绕组通以三相电流时，电机气隙中就会产生以同步转速 n_1 转动的旋转磁场。定子铁心槽内嵌有线圈，线圈是不动的，所以磁场旋转时，定子各线圈必定会切割磁力线而产生感应电势，此电势也是交变的。

定子各线圈匝数是相等的，又都是切割同一旋转磁场的磁力线，因而各线圈感应电势的大小必然相等。但由于各槽

线圈在空间位置上依次相隔一个槽距，因此各线圈感应电势在相位上必然依次相差一个角度 α。这个 α 也就是相邻两槽之间的电度角。如以 z_1 表示定子铁心槽数，由于一个极相当于 180° 电度角，所以

$$\alpha=\frac{\text{极数}\times180^{\circ}}{\text{定子槽数}}=\frac{2p\times180^{\circ}}{z_1}$$

应用第一章第一节讲过的交流电矢量图示法画出各槽电势的矢量就可以得到槽电势矢量图。图 3-4 和图 3-5 分别画出了 36 槽 4 极和 24 槽 2 极两只电动机的槽电势矢量图。在图 3-4 中 $\alpha=\frac{4\times180^{\circ}}{36}=20^{\circ}$；在图 3-5 中 $\alpha=\frac{2\times180^{\circ}}{24}=15^{\circ}$；图中各矢量直线长度相等。为统一起见，都把第 1 槽电势矢量画在水平右方作为基准 0° 初相角，并按顺时针方向标出 2、3、4、5……各槽号，意思是第 2、3、4、5……槽电势依次落后一个 α 电度角。

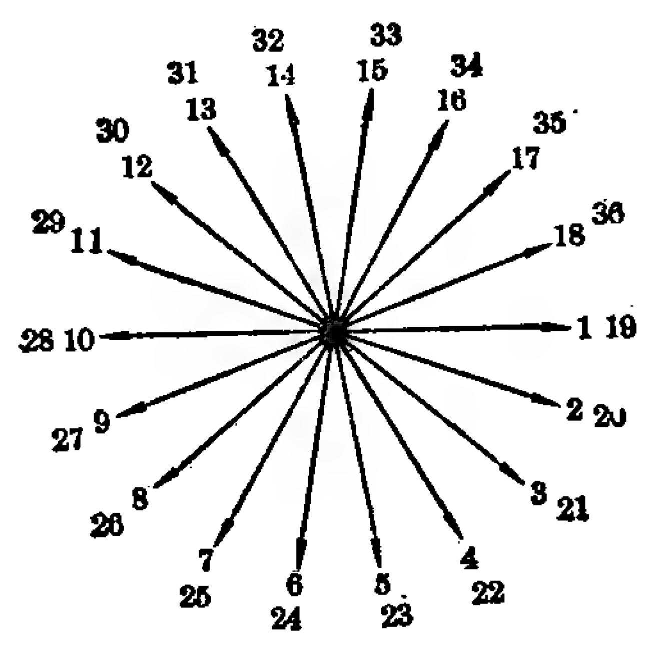


图 3-4　36 槽四极槽电势矢量图

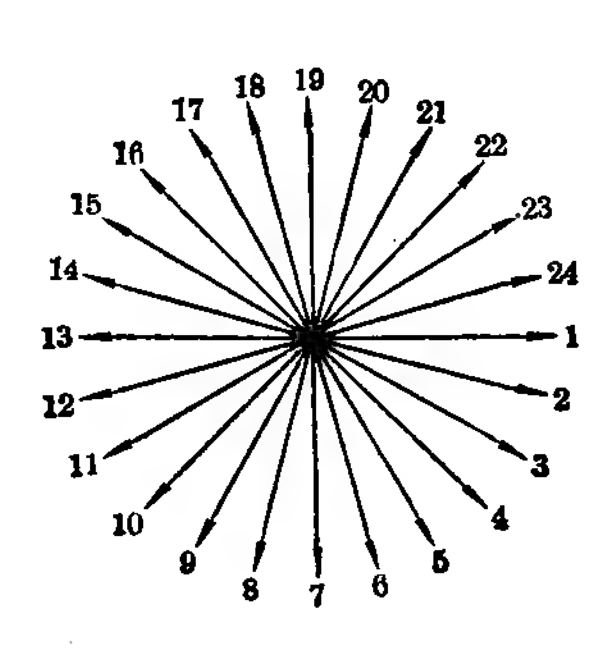


图 3-5　24 槽两极槽电势矢量图

对于双层绕组，作图时只需作每只线圈一个元件边的槽电势矢量就可以了，作出的槽电势矢量图就可以代表电动机

全部槽线圈感应电势的大小及相位关系。因为全部线圈另一元件边感应电势的相对关系完全和已作出的槽电势矢量图相同，不同的只是相差一短距所决定的电度角，这可以通过短距系数（详见第三节）来考虑。

2. 用槽电势矢量图排列绕组的方法

我们用实例来说明排列的方法（均为双层绕组）。

【例一】 一只定子36槽的电动机，欲绕成4极，试利用槽电势矢量图排出绕组。

1) 根据已知槽数和极数算出相邻两槽电度角 $\alpha=\frac{4\times180^\circ}{36}=20^\circ$；再根据 α 的大小画出槽电势矢量图，如图3-4；

2) 计算每极每相槽数 q：

定子槽数为 z_1，绕组相数 $m_1=3$，因此每相所占槽数 $=\frac{z_1}{m_1}$，此槽数应平均分布在所有极内，因此每极每相槽数 q 应等于 $\frac{z_1}{m_1 2p}$，本例中 $2p=4$，$z_1=36$，所以

$$q=\frac{z_1}{m_1 2p}=\frac{36}{3\times4}=3$$

$q=3$，俗称"一连三"；

3) 排出 A 相绕组：

① 任意取相邻的三个槽为 A 相在第一极下的槽，例如取1、2、3槽（这句话在嵌线时就意味着将三个元件边分别嵌在1、2、3槽内），并在矢量图的槽号"1、2、3"下标上相号"a"；

② 由于相邻两极必为异性，同一相第二极下各槽电势与第一极下各对应槽电势在相位上应相差180°，因此由电势矢量图知 A 相第二极下的槽应是10、11、12三槽，标上相号并

标以负号，负号意思是此三槽内元件产生的磁极相对于前一极为异性，在联接上就代表此三槽内元件电流的方向应和前三槽反向；

③ 同理，A 相在第三极和第四极下所占槽应分别是 19、20、21 和 28、29、30 六槽，分别标上相号，28、29、30 三槽也应取负号；

4）排出 B 相绕组：B 相绕组排法完全和 A 相相同，只是在取第一极下起始的三个槽时应保证和 A 相起始三槽在相位上相差 120°。本例中 A 相起始三槽为 1、2、3，相邻两槽电度角 $\alpha=20°$，因此 B 相起始三槽应为 7、8、9 槽；

B 相第二、三、四极所占槽号分别是 16、17、18，25、26、27，34、35、36，其中 16、17、18 和 34、35、36 六槽取负号；

5）排出 C 相绕组：排法也相同，起始三槽和 B 相起始三槽相位上应相差 120°，因此是 13、14、15 三槽。第二、三、四极所占槽号分别是 4、5、6，31、32、33，22、23、24，其中 4、5、6 和 22、23、24 六槽取负号；

排出的绕组见图 3-6；

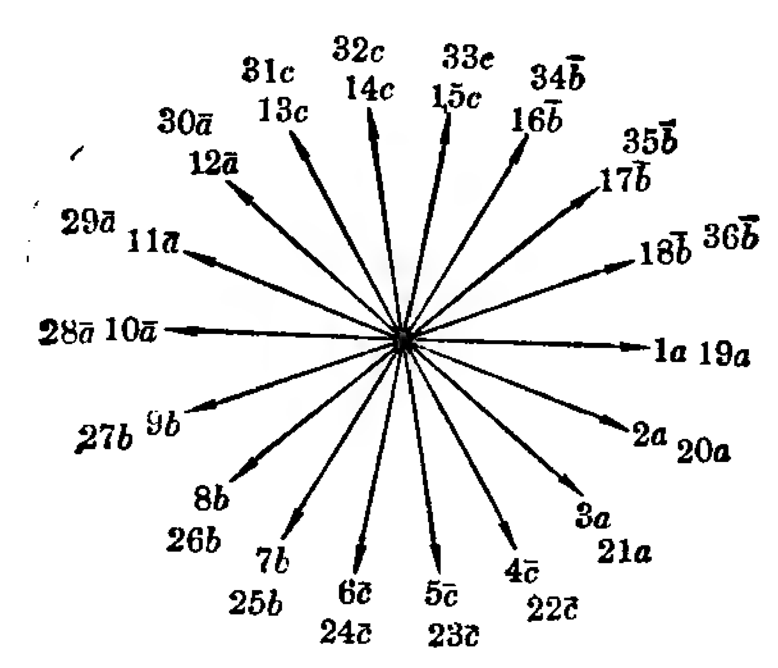


图 3-6　三相四极 36 槽定子绕组槽矢量图

6）检查三相是否对称：方法是把每一相所有的槽电势矢

量集中起来，其中相号为负的可把它作为正的归到与其反向的槽电势矢量上去，而在槽号上标以负号。用矢量加法把一相全部槽电势矢量加起来得出每一相的相矢量如图 3-7（图中相矢量长度已缩短）。

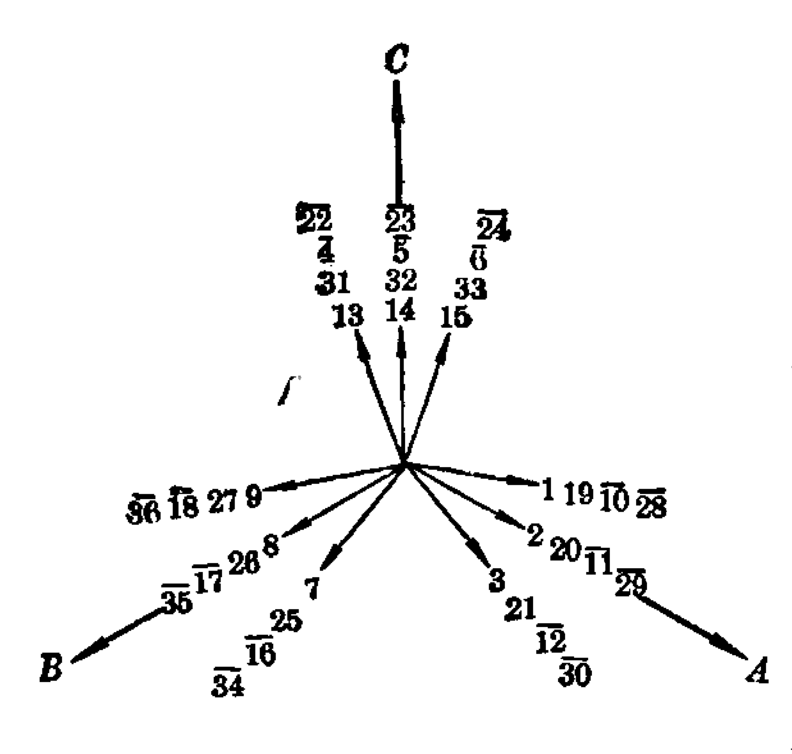


图 3-7　三相四极 36 槽定子绕组相矢量图

观察图 3-7 可知，三个相矢量相位互差 120°。同时由于三个相所有槽电势矢量分布都是对称的，因此三个相矢量大小也必然相等，从而满足了三相对称的要求。

全部绕组排好后，为更加清楚起见，可以列出绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
相　号	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
相　号	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$

对照已标上相号的槽电势矢量图或绕组排列表即可画出绕组图如图 3-8（跨距 $y=7$，即 1—8）。

【例二】 一只定子 24 槽电动机，欲绕成 2 极，试排出绕组。

1）相邻两槽电度角 $\alpha=\dfrac{2\times180^\circ}{24}=15^\circ$。槽电势矢量图如图 3-5；

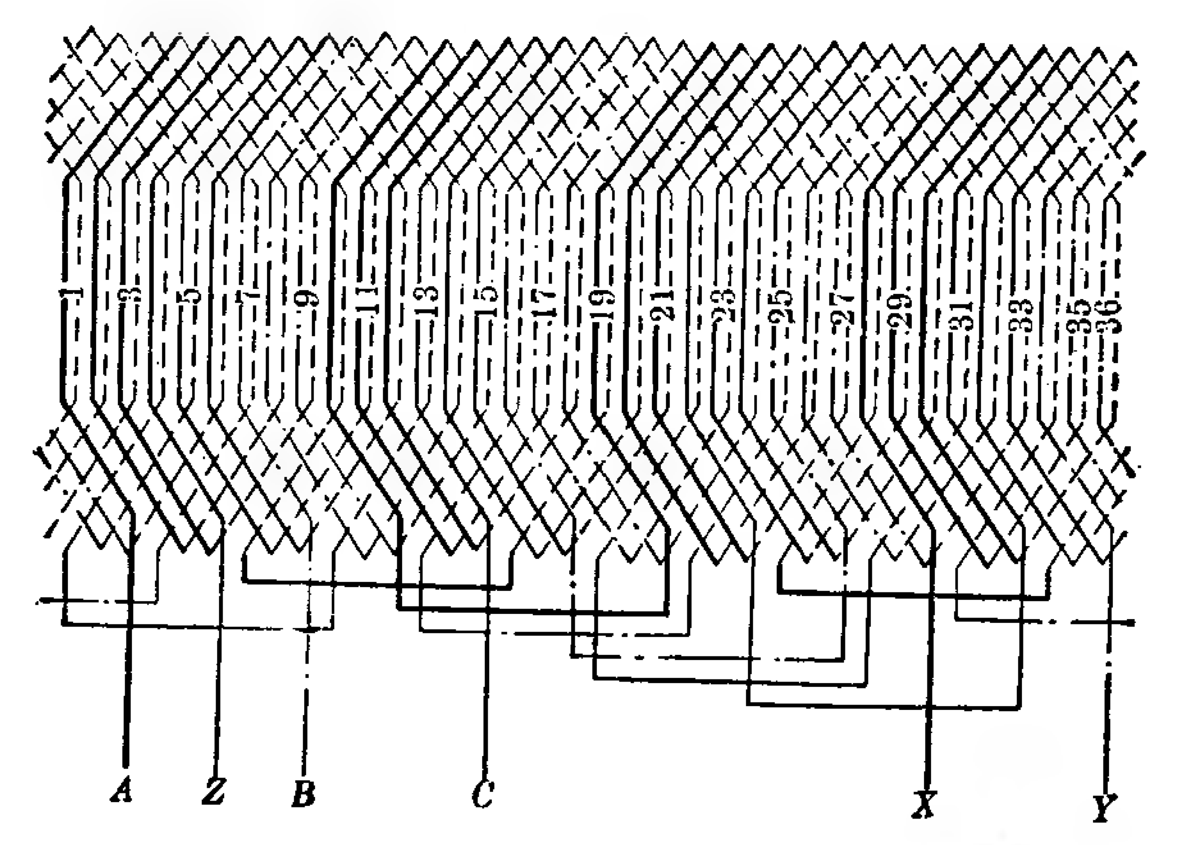


图 3-8 三相四极 36 槽定子绕组(双层迭绕)展开图

2) 每极每相槽数 $q=\frac{z_1}{m_1 2p}=\frac{24}{3\times2}=4$;

3) 排出 A 相绕组:

① 起始四槽取 1、2、3、4 四槽;

② 第二极为 13、14、15、16 槽,带"—"号;

4) 排出 B 相绕组:分别是 9、10、11、12 槽和 21、22、23、24 槽,后者带"—"号;

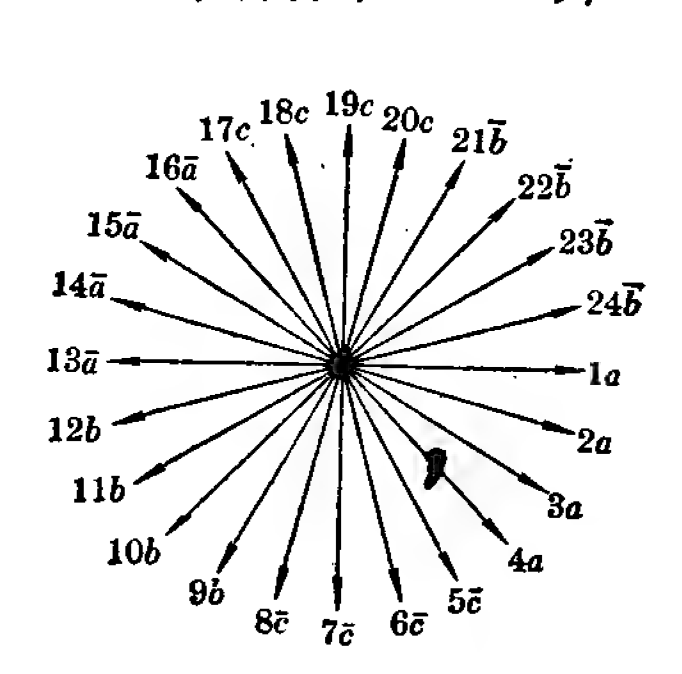


图 3-9 三相两极 24 槽定子绕组槽矢量图

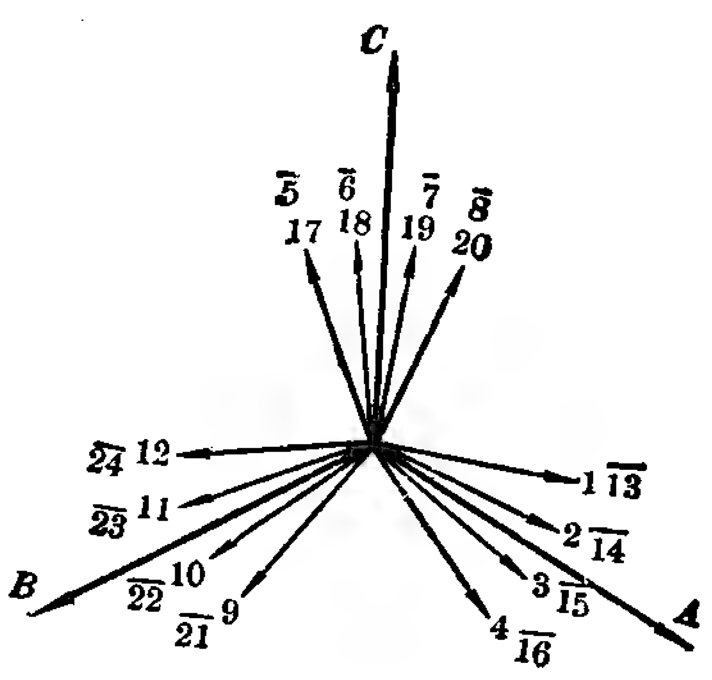


图 3-10 三相两极 24 槽定子绕组相矢量图

5) 排出 C 相绕组：分别是 17、18、19、20 槽和 5、6、7、8 槽，后者带“−”号；

排出的绕组见图 3-9；

6) 画出三个相矢量，见图 3-10，三相显然对称。

绕组排列表如下：

槽 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
相 号	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$

绕组展开图见图 3-11。

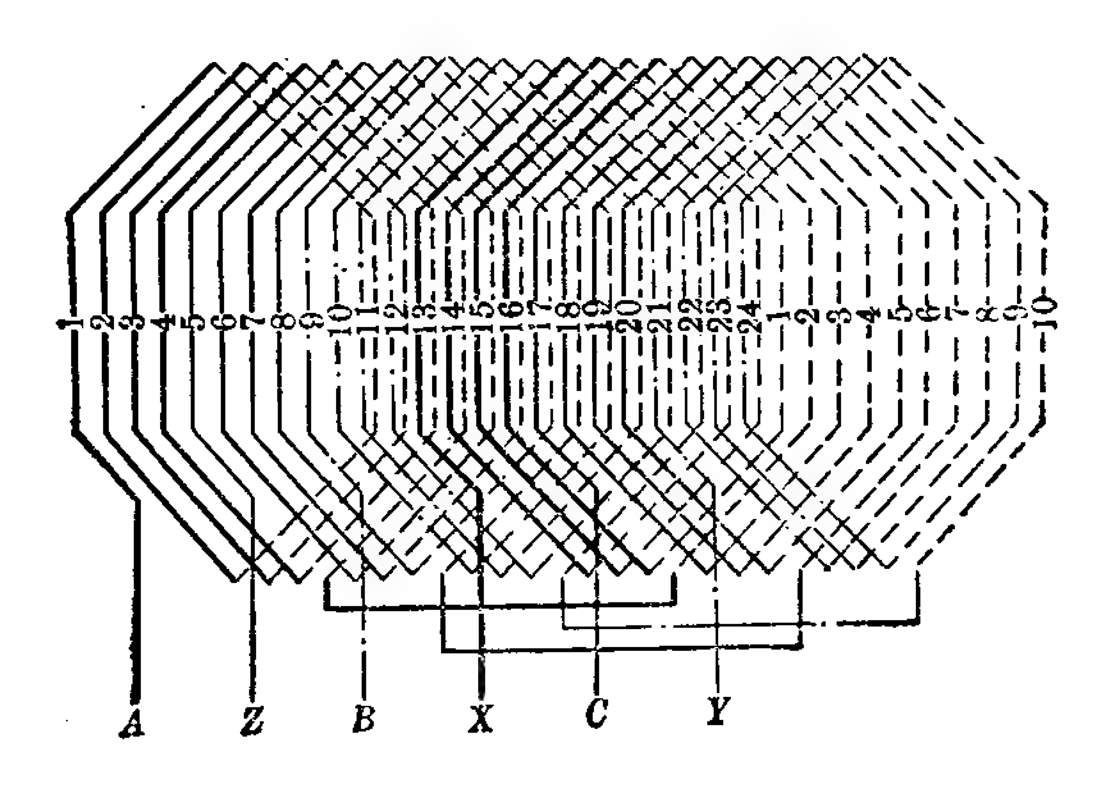


图 3-11 三相两极 24 槽定子绕组（双层迭绕）展开图

注意以上两例中的图 3-7 和图 3-10，A、B、C 三个相矢量的次序是顺时针方向，我们把这种相序关系叫做“顺序”或“正序”。也有相反的，叫做“逆序”或“负序”。顺序和逆序两者旋转磁场的转向是相反的。

第三节 分布系数、短距系数和绕组系数

工厂电工很多都绕过变压器，知道变压器每相绕组线圈

的全部匝数都是绕在一个铁心柱上的。通电后铁心柱两端一端为南极，一端为北极，不论对哪个极，每相绕组的全部匝数都是集中的。这种绕组我们叫作“集中绕组”。异步电动机各相绕组的情况与变压器不同，它是“分布”开来的，就是说不论对哪个极，每一相绕组在该极下的全部匝数都是平均地分布在几个槽内。换句话说，就是每极每相不是占一个槽而是占几个槽。

另外，变压器绕组是无所谓跨距的。而电动机中每相绕组是由一定数量的元件串联构成的，每个元件的两个边有一定的间距，嵌线时两个元件边落在不同的槽内，这就构成了“跨距”(符号 y)。跨距常以槽数来表示，例如 $y=7$ 意思就是一个元件边如嵌在第一槽，另一边就嵌在第8槽，其中间隔7槽。如果两元件边间隔槽数正好等于以槽数表示的极距 $\left(\text{极距}=\dfrac{\text{定子槽数}}{\text{极数}}\right)$，我们称之为“满距”；元件边间隔槽数小于极距称为“短距”；元件边间隔槽数大于极距称为“长距”。

异步电动机绕组既然是分布的，又具有一定跨距，就必然有它的特点。分布系数 K_d 和短距系数 K_y 就是用来反映绕组的分布和有一定跨距这两个特点的参数。绕组系数 K_{dy} 则是一个综合参数，它反映了电动机绕组的总的结构特点。

毛主席教导我们：**“有比较才能鉴别”**。下面我们就利用“集中”和“分布”，“满距”和“短距”的对比来说明分布系数 K_d 和短距系数 K_y 的意义及其计算。

1. 分布系数 K_d 的意义和计算

我们以前节例一电动机($q=3$)的一个极的情况为例来分析(其他极情况相同)。为简单起见，具有一定匝数的一个元件边我们把它看作为一根导线，这对分析是没有影响的。

如果绕组要成为集中的，q 就必须等于1。也就是三根导线(元件边)应该合在一个槽内。在这种情况下，若电动机内产生旋转磁场，三根导线切割磁力线产生的合成电势，必然为单根导线的三倍，如图 3-12，图中以 E 表示合成电势，E_k 表示单根导线产生的电势，$E=3E_k$。

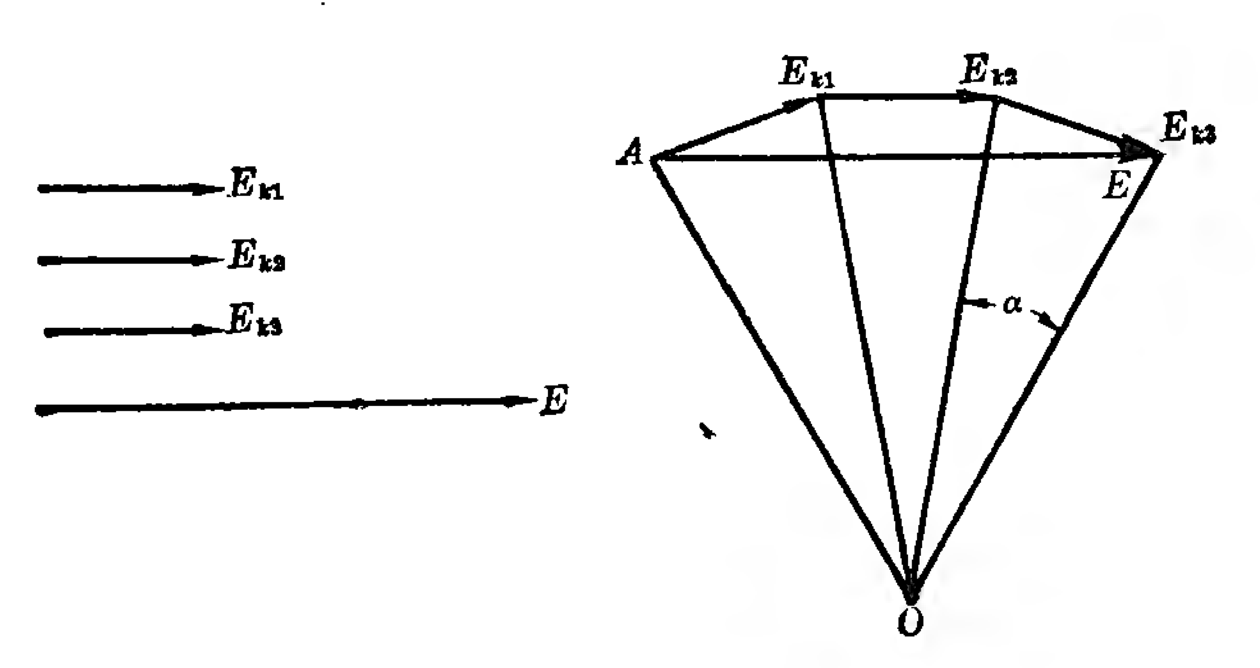


图 3-12　三个彼此间没有相位差的矢量相加

图 3-13　三个彼此间有相位差的矢量相加

现在，每极每相占有相邻的三个槽。由于三个槽电势相位上依次相差 α 角，合成电势就要用矢量加法得到，如图3-13，它必然比集中时小，也就是说比之集中时合成电势要打一个折扣。分布系数 K_d 就代表了这个折扣数，写成算式就是：

$$E_{分}=K_dE_{集}\ 或\ K_d=\frac{E_{分}}{E_{集}}$$

K_d 的数值小于1。

分布系数 K_d 的数值可以用槽电势矢量图求出，方法是将一相所含全部槽电势矢量(以下均简称为槽矢量)加起来得出相矢量，然后将相矢量的数值除以槽矢量的算术和(槽矢量的算术和=单个矢量值×矢量数)即得分布系数值。现用此法求本例的分布系数。为简单计，每根槽矢量长度我们规定

为 1，图 3-14(*a*)画出了图 3-6 中 A 相所有的槽矢量(负向已归到正向)，它共有三个方向，每个方向上含 4 槽，故图 3-14 中每根矢量长度应为 4。把三个方向上矢量加起来得出相矢量 A，量得其长度为 11.52，于是分布系数 $K_d=\frac{11.52}{4\times3}=0.96$。

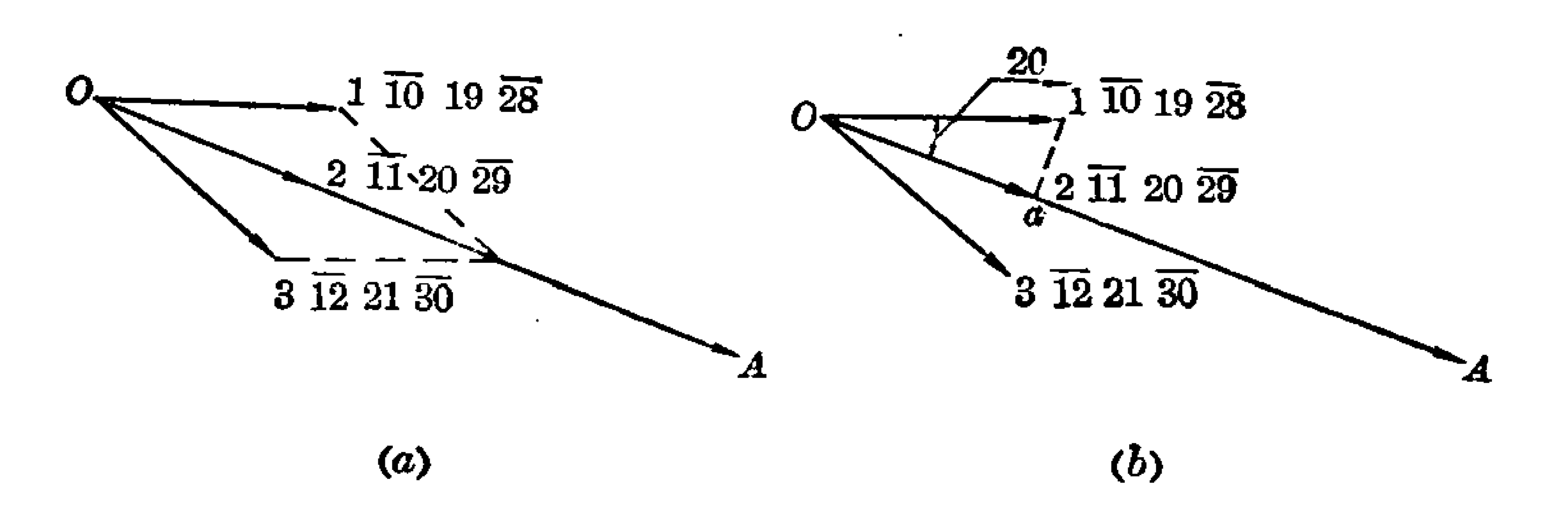


图 3-14　以每相槽矢量相加求得相矢量以求分布系数

(*a*) 直接量度矢量相加；(*b*) 利用三角函数计算

直接量度相矢量的数值求分布系数很不方便，因此通常都是利用投影和三角函数直接算出分布系数。如图 3-14(*b*)，槽 1、$\overline{10}$、19、$\overline{28}$ 的矢量 (数值＝4) 在相矢量 A 上的投影为 Oa，用三角函数公式可算得 $Oa=4\cos 20°$，同样，槽 3、$\overline{12}$、21、$\overline{30}$ 的矢量在相矢量 A 上的投影也是 $4\cos 20°$，槽 2、$\overline{11}$、20、$\overline{29}$ 的矢量和相矢量 A 方向一致，因此投影就等于 4。于是直接得到相矢量 A 的数值$=8\cos 20°+4$，分布系数 $K_d=\frac{8\cos 20°+4}{12}=\frac{8\times0.94+4}{12}=\frac{11.52}{12}=0.96$。

一般分布系数 K_d 用下式计算：

$$K_d=\frac{\sin\frac{q\alpha}{2}}{q\sin\frac{\alpha}{2}}$$

此公式可从图 3-13 中推导得出(本书从略)，式中 q 和 α 的意义如前所述。

用公式计算以及用槽矢量图计算两者结果是一致的。对于本例，$q=3$, $\alpha=20°$，用公式计算得:

$$K_d=\frac{\sin\frac{3\times 20°}{2}}{3\sin\frac{20°}{2}}=\frac{\sin 30°}{3\sin 10°}$$

$$=\frac{0.5}{3\times 0.1736}=0.96$$

用公式计算分布系数，它只适用于 60° 相带绕组和 120° 相带绕组 (60° 相带绕组和 120° 相带绕组的概念见第八章)；并且对于分数槽 60° 相带绕组，应将每极每相槽数 q 化为假分数 $\frac{a}{b}$，取其分子 a 作公式中的 q 值，相邻两槽电度角 α 按 $\frac{2p\times 180°}{z_1\cdot b}$ 计算。120° 相带绕组 (下章提到的庶极接法绕组就是 120° 相带绕组) 的每极每相槽数 q 应按式 $q=\frac{z_1}{m_1 p}$ 计算，不应按 $\frac{z_1}{m_1\cdot 2p}$ 计算。

用槽矢量图求分布系数的方法可应用于任何绕组，没有局限性。因此本书以后各章求分布系数将较多地用此法。

2. 短距系数 K_y 的意义和计算

仍以前节例一的电动机为例。定子槽数 $z_1=36$，极数 $2p=4$。以槽数计极距 $\tau=9$；一个元件的两边跨 1—10 槽，正好是满距，如图 3-15 所示，一个边如在北极中心，另一边正好在南极中心。今设跨距为 7，短两槽(相当于 40° 电度角)，则元件边位置如图 3-16 所示。

磁场旋转时元件边将产生感应电势，如为满距，元件边

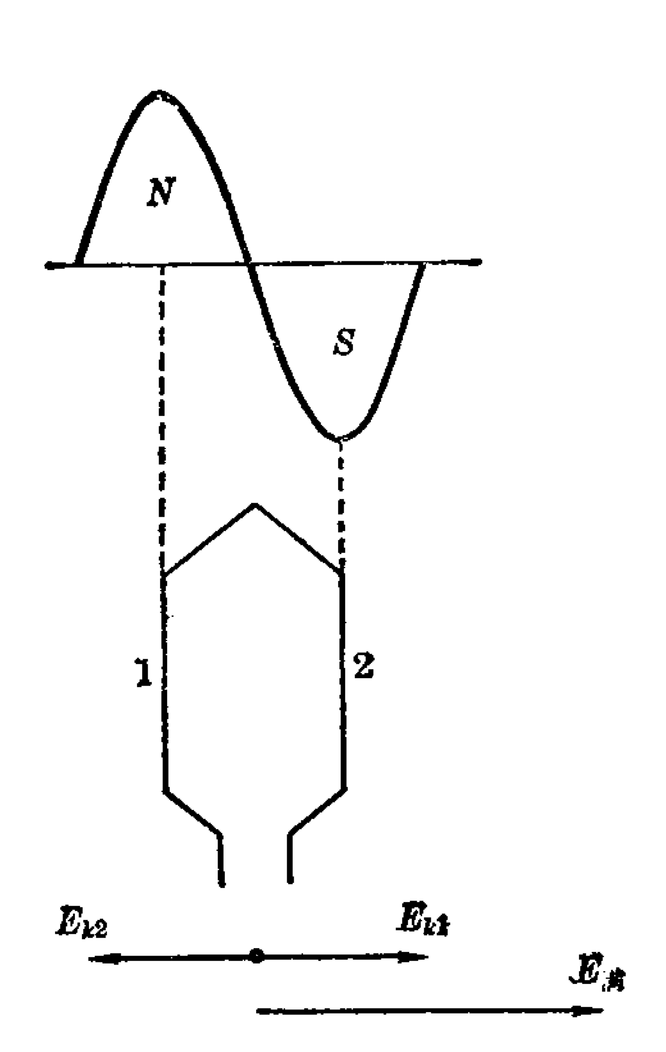


图 3-15　满距情况下的槽矢量及其合成

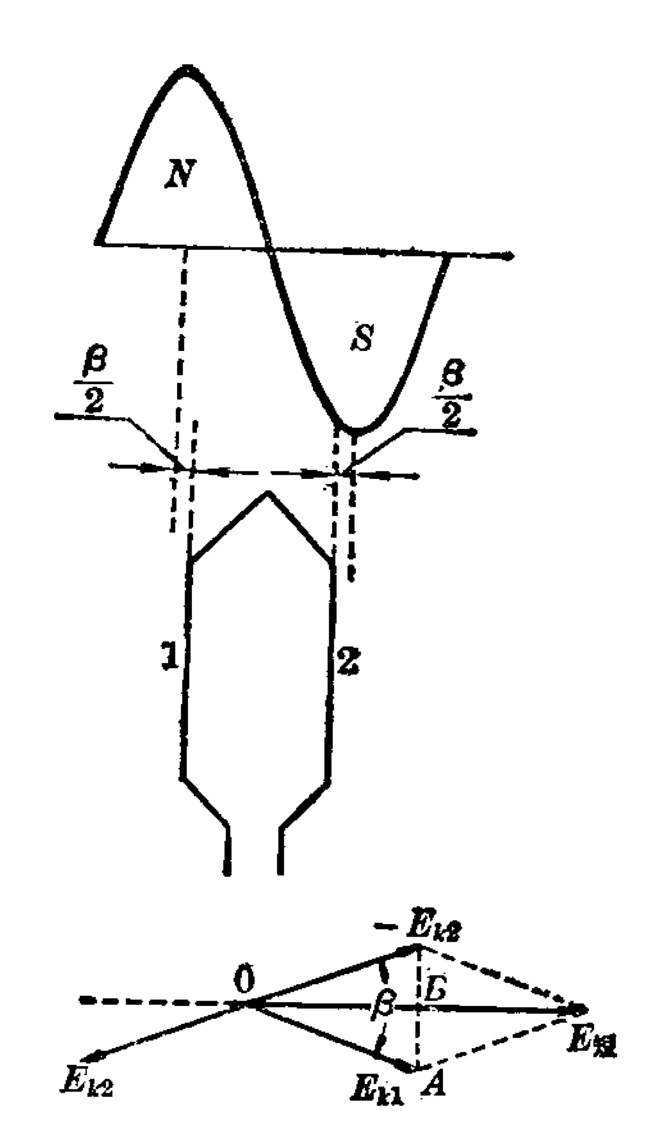


图 3-16　短距情况下的槽矢量及其合成

1、2 的感应电势 E_{k1}、E_{k2} 相位差将为 180°，因为元件边 1、2 位于不同极下，所以合成电势 $E_{满}$ 为一根边电势 E_k 的两倍，即 $E_{满}=2E_k$。短距时，E_{k1}、E_{k2} 相位差 <180°，本例中为 140°，用矢量加法得到的一个元件的合成电势 $E_{短}$ 必然小于 $E_{满}$，也就是说要打一个折扣。短距系数 K_y 就代表了这个折扣数，写成算式就是：

$$E_{短}=K_yE_{满} \text{ 或 } K_y=\frac{E_{短}}{E_{满}}$$

K_y 的数值小于 1。现在来计算 K_y 的数值，为此必须算出 $E_{短}$。

在图 3-16 的直角三角形 OAB 中，利用三角函数关系可得：

$$\cos\frac{\beta}{2}=\frac{OB}{OA}=\frac{\frac{E_{短}}{2}}{E_k}$$

$$\frac{E_{短}}{2}=E_k\times\cos\frac{\beta}{2}$$

$$E_{短}=2E_k\times\cos\frac{\beta}{2}$$

已知 $E_{满}=2E_k$

$$\therefore\quad E_{短}=E_{满}\times\cos\frac{\beta}{2}$$

短距系数 $$K_y=\frac{E_{短}}{E_{满}}=\cos\frac{\beta}{2}$$

这就是 K_y 的计算公式，式中 β 表示一个元件两边较之满距所短的电度角。

本例中 $\beta=40°$，计算得：

$$K_y=\cos\frac{40°}{2}=\cos 20°=0.94$$

短距系数 K_y 的计算公式有时也化作另一形式：

$$K_y=\sin\frac{y}{\tau}\cdot\frac{\pi}{2}$$

证明如下：

元件两边所短电度角＝满距电度角－短距时元件两边所跨电度角，即

$$\beta=\pi-\frac{y}{\tau}\cdot\pi$$

于是： $$K_y=\cos\frac{\beta}{2}=\cos\left(\frac{\pi}{2}-\frac{y}{\tau}\cdot\frac{\pi}{2}\right)$$

根据三角学中的公式 $\cos\left(\frac{\pi}{2}-A\right)=\sin A$，得

$$K_y=\cos\left(\frac{\pi}{2}-\frac{y}{\tau}\cdot\frac{\pi}{2}\right)=\sin\frac{y}{\tau}\cdot\frac{\pi}{2}$$

本例中 $y=7$, $\tau=9$, 故

$$K_y=\sin\frac{7}{9}\cdot 90^\circ=\sin 70^\circ=0.94$$

与另一算式结果完全一致。

在改绕多速电动机时有时会遇到“长距”的情况，即一个元件两边电势相位差大于180°。这种情况和短距一样，仍以 K_y 来反映它的特点，不同的只是计算时 β 代表一个元件两边所长出的电度角。

3．绕组系数 K_{dy} 的意义和计算

绕组系数是反映异步电动机绕组结构总特点的一个参数，它代表分布短距绕组每相合成电势相对于集中满距绕组每相合成电势所打的折扣数，在数量上等于分布系数和短距系数的乘积：$K_{dy}=K_d\cdot K_y$。

前节例一中电动机的绕组系数 $K_{dy}=0.96\times 0.94=0.9$

异步电动机绕组所以都采取分布的，并且常常是短距的，主要是因为这样的绕组可以削弱三相绕组的谐波磁场（详见第八章）以保证电动机有较好的转矩特性；其次，分布绕组较之集中绕组能更充分地利用空间地位，并有利于散热；采用适当短距的绕组，可以缩短元件的端接长度，有利于节约铜线。

第四节　槽电流表和绕组磁势图

对于一个一定槽数（定子）的电动机，利用槽矢量图排出绕组并取定了跨距之后，如果再进一步列出槽电流表和画出绕组磁势图，就可从槽电流表中清楚地看出这个绕组将产生的极数，从绕组磁势图中则可直观地虽然是粗略地判断出这个磁场所含谐波成分的大小（我们希望谐波愈小愈好）。

1. 槽电流表

我们以图 3-8 所示绕组为例说明槽电流表的列法：

1）任意取定一个瞬间，例如取图 3-17 中瞬间 a。设三相电流振幅为 1，则此瞬间各相电流为：$i_a=i_b=\frac{1}{2}$，$i_c=-1$；

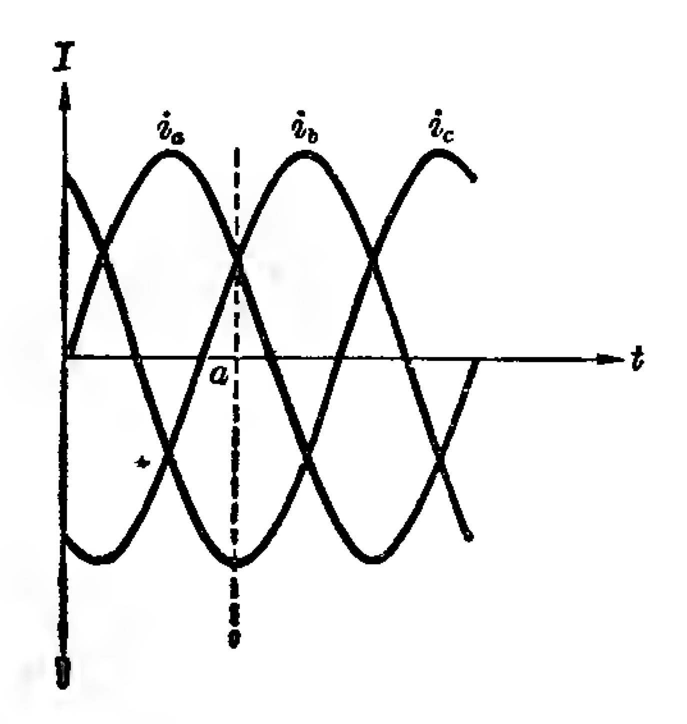


图 3-17 三相交变电流在不同瞬间的数值关系

2）画出表格，并在格中标出各相所有槽电流的方向。为此必须确定电流的正、负方向，前已规定线圈中电流自“头”流入，“尾”流出方向为正，相反为负，这样，在Y和△接法时线圈电流的正方向将如图 3-18 所示。在瞬间 a，i_a、i_b 为正，电流自“A”、“B”端流入，“X”、“Y”端流出；i_c 为负，电流自“Z”端流入，“C”端流出；于是各相槽电流方向就可标出；

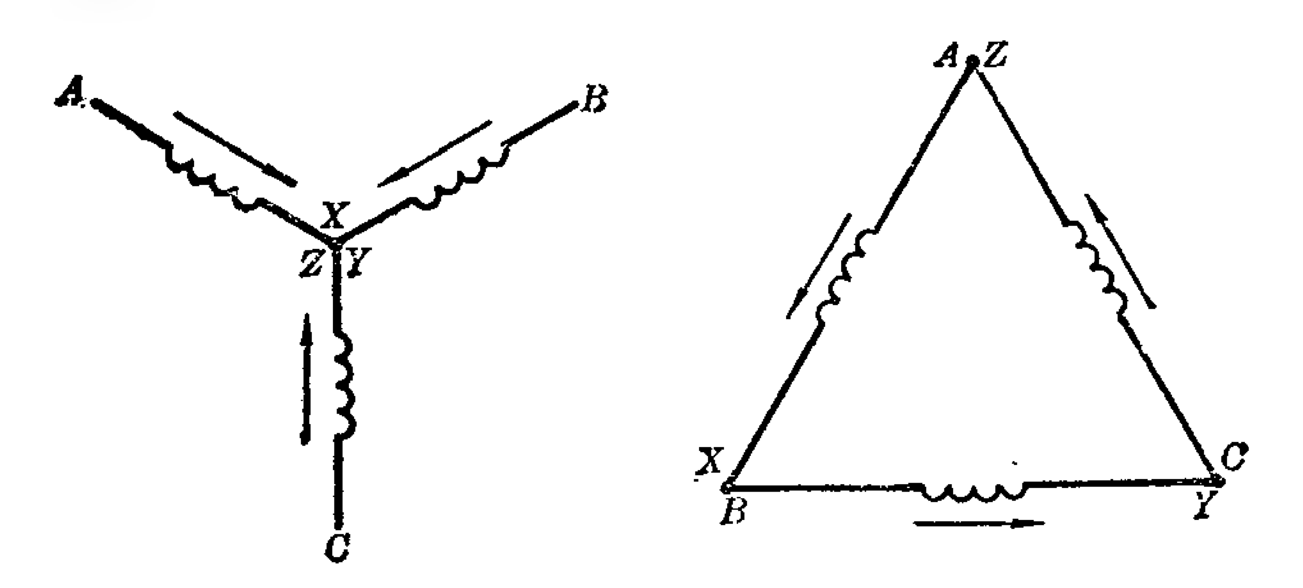


图 3-18 列槽电流表时取定的电流方向

3）各相所有槽电流标出后，记住凡是 i_a，i_b 相电流一个箭头数量上等于 1/2，i_c 相一个箭头数量上等于 1，把 i_a、i_b、i_c 三相电流加起来就可标出各槽内合成电流的方向和数值，

这样就可列出槽电流表如下：

槽号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
i_a		↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓					↑	↑
i_b						↑	↑	↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓
i_c			↑	↑	↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓			
$i_{合}$	方向	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
	数值	1	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	1	0	0	1	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	1	0	0
槽号		19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
i_a		↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓					↑	↑
i_b						↑	↑	↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓
i_c			↑	↑	↑↑	↑	↑					↓	↓	↓↓	↓	↓			
$i_{合}$	方向	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑			↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
	数值	1	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	1	0	0	1	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	2	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	1	0	0

从表中我们可清楚地看到槽电流有两个正方向（箭头向上），两个负方向（箭头向下），而且正负是交替的。正方向电流如果产生北极，负方向电流必产生南极，所以表中槽电流必产生南北交替的四个极。

2．绕组磁势图

在槽电流表的基础上，可以直接画出绕组磁势图如图3-19，画法是：凡遇槽电流为正，就向上跳格，跳格高度与该槽电流数值成正比；凡遇槽电流为负，就向下跳格，高度也与电流成正比。每格之间连以横线。由于相邻两极磁势相等，所以绕组磁势图正负部分面积应相等。在开始画时，应先观察一下各槽电流数值，看从那一个槽开始画才能使正、负磁势面积相等。但是，如果观察错了也不要紧，只要在画好的不

对称的磁势图中，将横轴上下移动一下，直至磁势正、负部分面积相等即可。

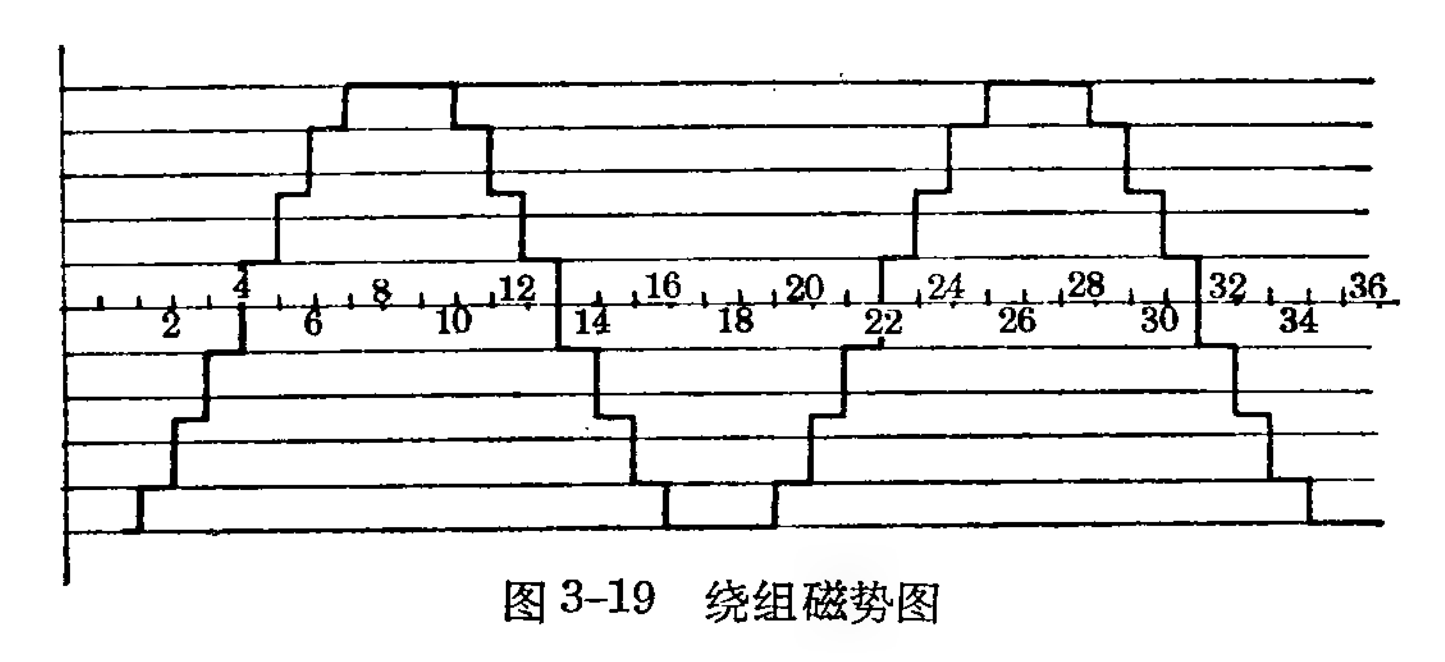


图 3-19　绕组磁势图

由图 3-19 可清楚地看到在瞬间 *a* 时四个极在槽内的分布情况。

由图 3-19 可以看到，电动机内旋转磁场沿气隙圆周并不是按正弦波而是按梯阶形波分布的*。这个梯阶波具有一定的周期。进一步分析可以证明，这种具有周期性的非正弦波，是由一系列频率不同（成倍数关系）的正弦波组成的，其中频率和原波形相等的叫做基波，振幅最大；频率为原波形两倍的叫作二次谐波；三倍的叫三次谐波（二次以上波统称“谐波”）；谐波次数愈高，振幅愈小。图 3-20 画出了一个矩形波（旋转磁场实际波形可以看成是许多不同的矩形波的迭加）的基波以及三次、五次和七次谐波，其中基波、三次和七次波为正，五次波为负。

要精确地分析一个周期性非正弦波的谐波，并计算各次谐波的大小，需要较深的数学，这里就不说了。但是我们可以指出一点，即非正弦波波形若与正弦波相差愈大，谐波就愈多；相反则愈少。我们画出绕组磁势图后，可以根据该图与正

* 前面我们分析时，把它当作正弦波，这是针对基波而言的。

弦波形相差的程度，粗略地判断出所含谐波的多少。

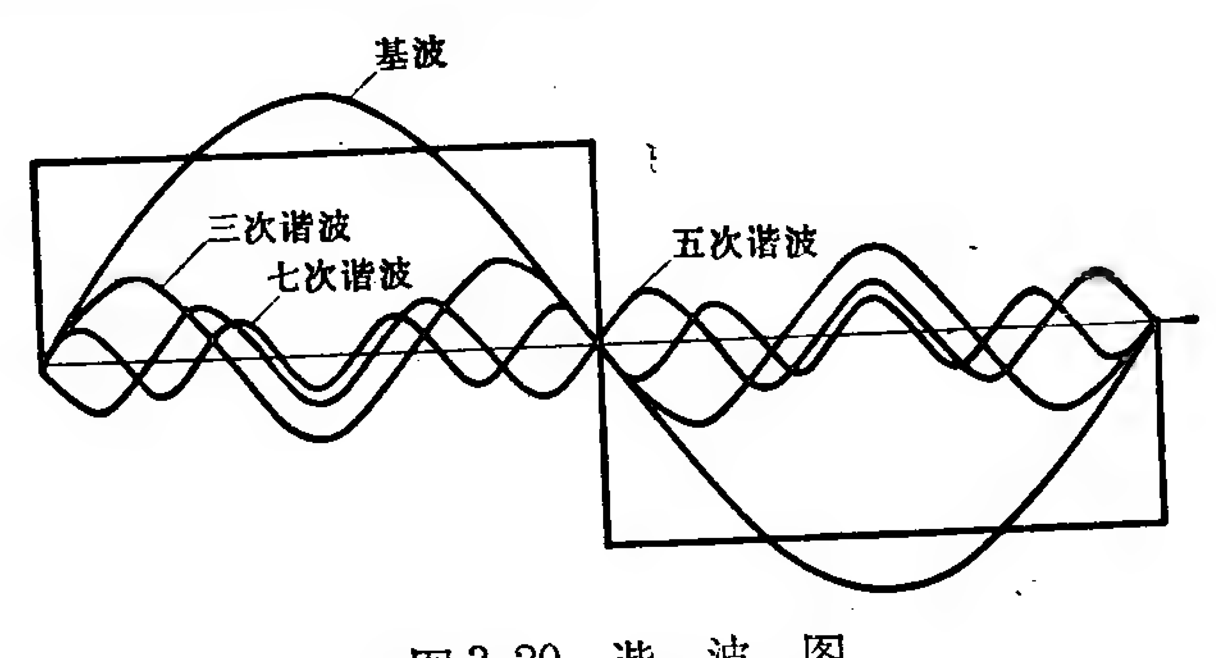


图3-20 谐 波 图

由于不同的三相电流瞬间，绕组磁势波形也有不同。所以为了观察一个绕组磁势波形的好坏，应该取两个或两个以上的瞬间来画出它的磁势波形，以便能比较正确地作出判断。

第四章　变极调速的原理和方法

异步电动机的调速有多种方法。从定子绕组上采取措施的有：改变绕组极数，改变电源频率，改变电源电压等；从输出轴上采取措施的有在轴上加一级电磁离合器的滑差调速。这些方法都各有优缺点。本书只讨论变极调速，这种方法虽然是有级调速，但方法比较简单，对很多情况下的变速要求已能满足。

第一节　变极调速原理

在第二章里我们已说过，异步电动机定子绕组通以三相电流，就能在气隙中产生一个以同步转速转动的旋转磁场。同步转速 n_1 和电源频率 f、绕组极对数 p 有如下关系：

$$n_1=\frac{60f}{p}\text{〔转/分〕}$$

由此看出，只要设法改变绕组极对数 p，就可以改变同步转速 n_1，从而改变转子转速 n。p 愈大，n 愈小；p 愈小，n 愈大。

改变定子绕组极对数，一般有以下三种方法：

1）单一绕组，改变其不同的接线组合，得到不同的极对数；

2）在定子槽内安放两个有不同极对数的独立绕组；

3）在定子槽内安放两个不同极对数的独立绕组，而且每个绕组又可以有不同的接线组合，得到不同的极对数。

对工厂电工来说，第一种方法最简易实用，因为它绕法简

单，出线头较少，用铜也较省。所以单速异步电动机改绕多速大多采用此法。本章讨论的也就是这种单绕组多速异步电动机的变极原理和方法。

单绕组多速异步电动机的变极方法也有多种，本章介绍三种：反向法，换相法和变跨距法。

第二节　反向变极法的原理和绕组排列

反向变极法（简称反向法，下同）是单绕组多速异步电动机变极方法中最普遍常用的一种，本章将着重予以讨论。

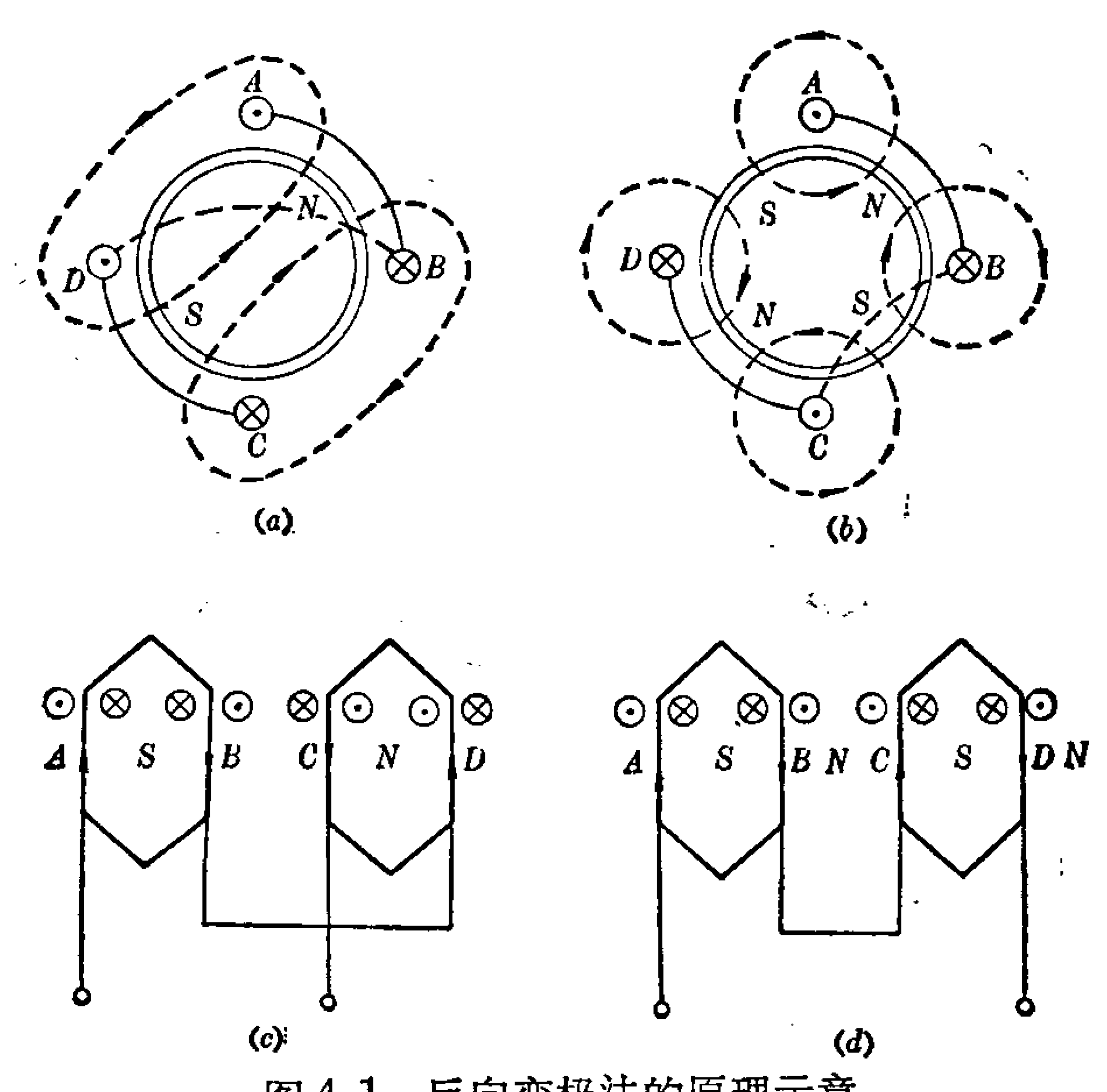


图 4-1　反向变极法的原理示意

（图中(a)、(b)表示转子上的极性，与(c)、(d)所表定子极性正好相反。）

1．反向法变极原理

我们以最简单的 2/4 极来说明反向法变极原理。图 4-1

(a)、(b) 表示了由两个元件构成的一个相绕组在定子上的分布情况。两个元件的联接在图 4-1(a)和(b) 中以不同方式画出，每根元件边产生的磁场以虚线表示。由图 4-1 可清楚地看出，两个元件如(a)、(c)那样联接将产生一对极(两极)；两元件接法如换成图 4-1(b)、(d)所示，就产生两对极(即四极)，极数增加了一倍。

比较图 4-1 的(a)、(c)和(b)、(d)可以知道，极数加倍的原因在于相线圈的一半电流反了向，所以这种变极方法叫作反向法。

利用相线圈电流部分反向的原理，除了得到倍极比 (2/4 极，4/8 极等) 多速异步电动机外，还可以得到非倍极比 (4/6 极，6/8 极等) 多速异步电动机。图 4-2(a) 表示一只四极电动机某一相的全部线圈及其联接；在图 4-2(b)中，元件 3、4 中的

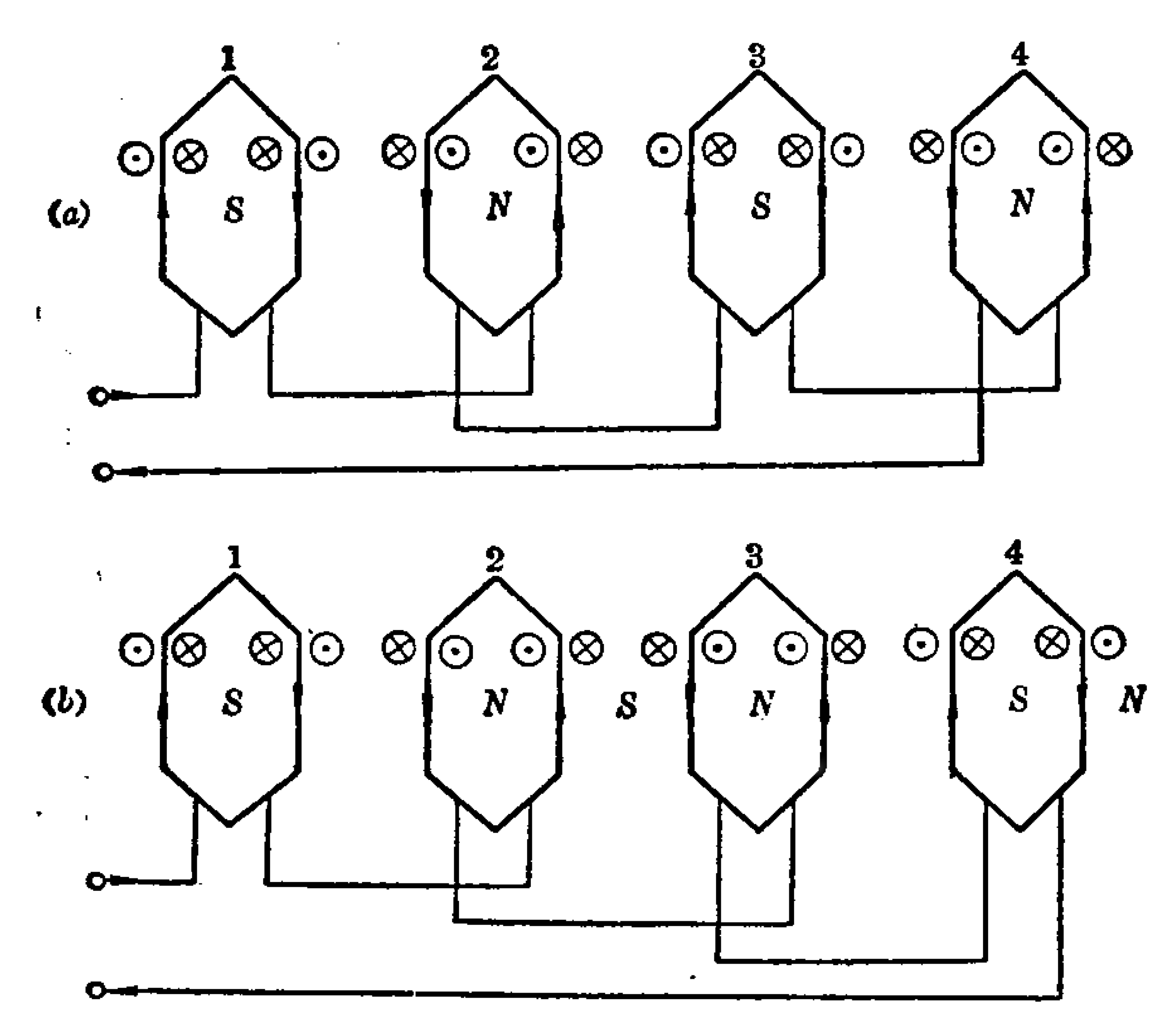


图 4-2　在非倍极比的情况下反向变极时绕组联接的变化

(a) 四极；(b) 六极

电流反了向，画出每根元件边产生的磁场方向，就可知这样的接法产生了六个极。

2. 应用槽矢量图排列多速电动机绕组

上面用线圈联接图说明了变极原理，这只能作原理性的示意，不能得出全部绕组的排列。要得出多速异步电动机的绕组排列，可以应用第三章介绍过的槽矢量图。下面我们分别就倍极比双速、非倍极比双速、三速三种情况，各通过实例来说明如何应用槽矢量图排出多速单绕组的方案。

(1) 倍极比双速电动机的绕组排列

排列倍极比双速异步电动机绕组通常都以少极数为基准极，用庶极接法获得倍极。下面用实例加以说明。

【例一】一只定子 36 槽的电动机，试利用反向法排出 4/8 极双速单绕组方案

1) 先按第三章叙述的利用槽矢量图排列绕组的方法，排出 4 极绕组如图 4-3 所示；

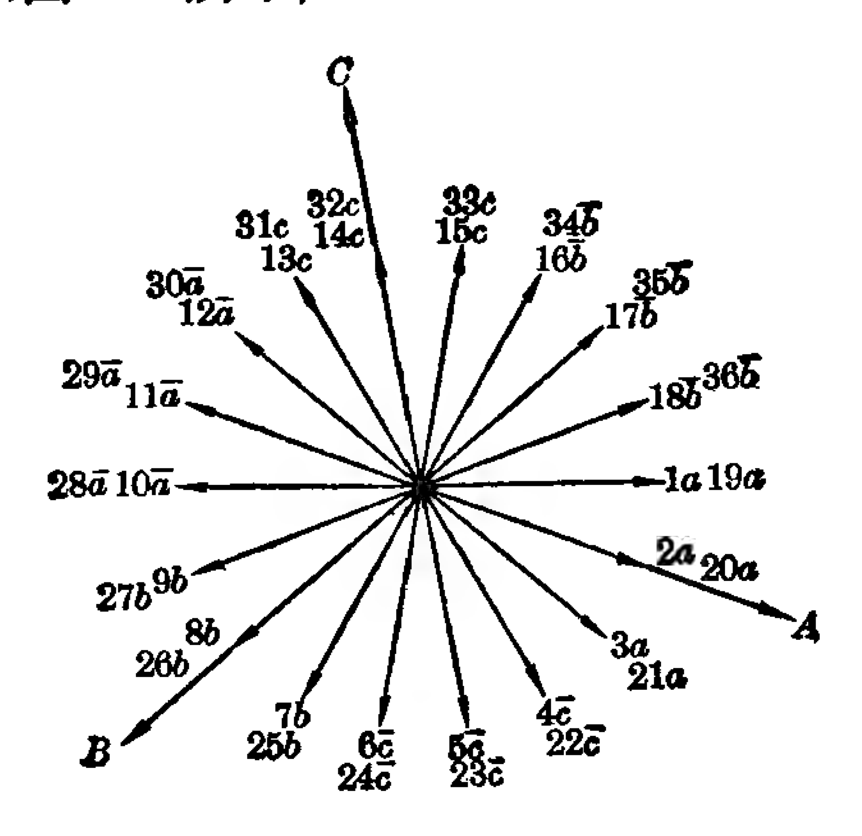


图 4-3 36 槽四极槽矢量图

2) 画出 8 极时槽矢量图如图 4-4，并在各矢量方向上标

出槽号；相邻两槽电度角 $\alpha=\dfrac{8\times180^\circ}{36}=40^\circ$；

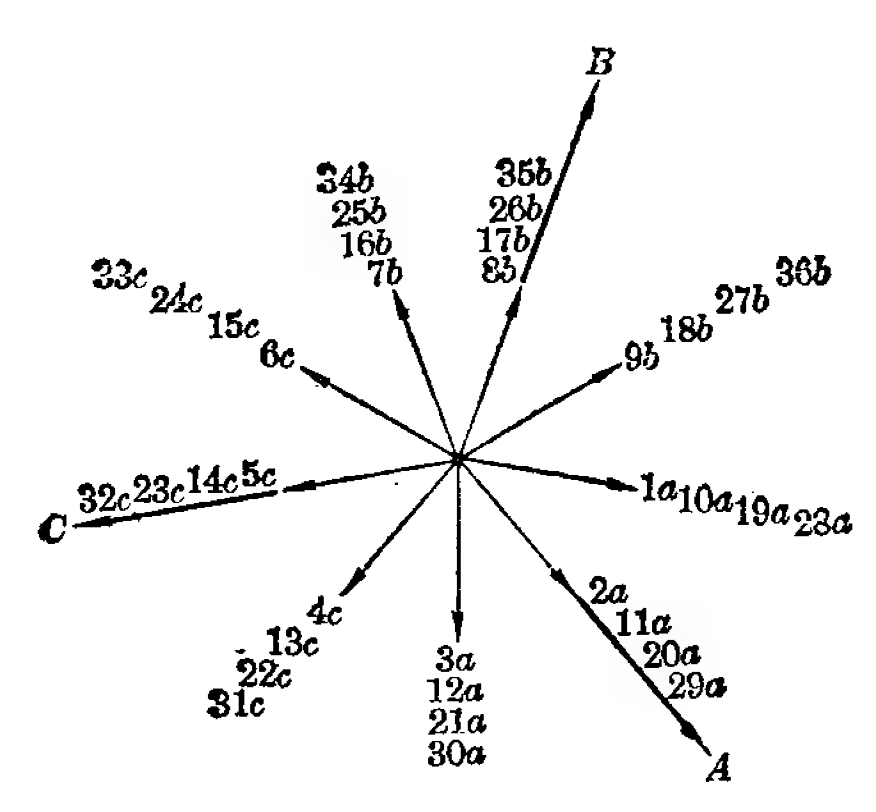


图 4-4　36 槽八极槽矢量

3）按照各槽相号不变的原则（反向法只变线圈电流方向，槽所属相不变），即某槽 4 极时属 A（或 B、C）相，8 极时仍属 A（或 B、C）相，对照 4 极相号在 8 极槽矢量图上标出各槽相号；

4）确定各槽相号的正负。为此要先选定三个相矢量的方向。根据图 4-4 上各相矢量分布情况，显然 A 相矢量应选定槽 2、11、20、29 方向，B 和 C 两相矢量应选定槽 8、17、26、35 和槽 5、14、23、32 方向。三个相矢量相位正好互差 120°。

各槽相号的正负，可根据它在本相矢量上投影的正负来决定：凡是与本相矢量交角小于 90° 的槽矢量相号都为正，大于 90° 的都为负。按此方法，对照图 4-4 可知图中各槽相号都应为正，这意味着联结时每相槽内全部元件中电流流向都应相同（这种联接方法通常称作庶极接法）；

5）检查各极下三相是否对称。如不对称，应重新考虑排

列方案；

6）列出全部绕组排列表如下；

36 槽 4/8 极电动机绕组排列表

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*

表中记号 * 表示该槽在变极时反向，由表可清楚看出无论 A 相、B 相和 C 相，变极时都有一半线圈反向，这和前面变极原理中所说结论是一致的；

7）计算绕组系数：分布系数用第三章的公式计算：

4 极时 $\alpha=20°$，每极每相槽数 $q=\dfrac{36}{3\times4}=3$，分布系数

$$K_{d4}=\frac{\sin\dfrac{q\alpha}{2}}{q\sin\dfrac{\alpha}{2}}=\frac{\sin\dfrac{3\times20°}{2}}{3\sin\dfrac{20°}{2}}=\frac{\sin30°}{3\sin10°}$$

$$=\frac{0.5}{3\times0.1736}=\frac{0.5}{0.5208}=0.96$$

8 极时每极每相槽数 q 仍应等于 3，因为从矢量图上看出，对任一相来说，它的矢量分布情况和 4 极时是一样的（即凡用庶极接法获得的倍极，其 q 值和原极数相等），用第三章

所说方法求 q 也一样：$q=\frac{z_1}{m_1 p}=\frac{36}{3\times 4}=3, \alpha=40°$，分布系数

$$K_{d8}=\frac{\sin\frac{3\times 40°}{2}}{3\sin\frac{40°}{2}}=\frac{\sin 60°}{3\sin 20°}=\frac{0.866}{3\times 0.342}$$

$$=\frac{0.866}{1.026}=0.844$$

欲求短距系数 K_y，必须确定跨距。通常为照顾多极数下的出力，倍极比双速绕组跨距常取为接近或等于多极数的满距；也有取少极数满距的 2/3 的，此时多极数跨距将为满距的 4/3，两种极数下短距系数相等。本例中取 $y=5$，4 极时短 4 槽，相当于 80° 电度角；8 极时长 0.5 槽，相当于 20° 电度角。所以 $K_{y4}=\cos\frac{\beta}{2}=\cos\frac{80°}{2}=\cos 40°=0.766$，$K_{y8}=\cos\frac{\beta}{2}=\cos 10°=0.985$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy4}=K_{d4}\times K_{y4}=0.96\times 0.766=0.735$$

$$K_{dy8}=K_{d8}\times K_{y8}=0.844\times 0.985=0.831$$

比较图 4-3 和图 4-4 中相矢量的相序，两者正相反：4 极为顺序，8 极为逆序，因此两种极数的转向相反。这种绕组方案叫做“反转向方案”。如果使用场合中要求两种极数的转向相同，只要将 8 极时三根电源线中任意两根对调即可。

【例二】一只定子 24 槽电动机，试利用反向法排出 2/4 极双速单绕组方案。

1）按第三章所述方法排出 2 极时绕组如图 4-5；

2）画出 4 极槽矢量图，标上槽号，如图 4-6；相邻两槽电度角 $\alpha=\frac{4\times 180°}{24}=30°$；

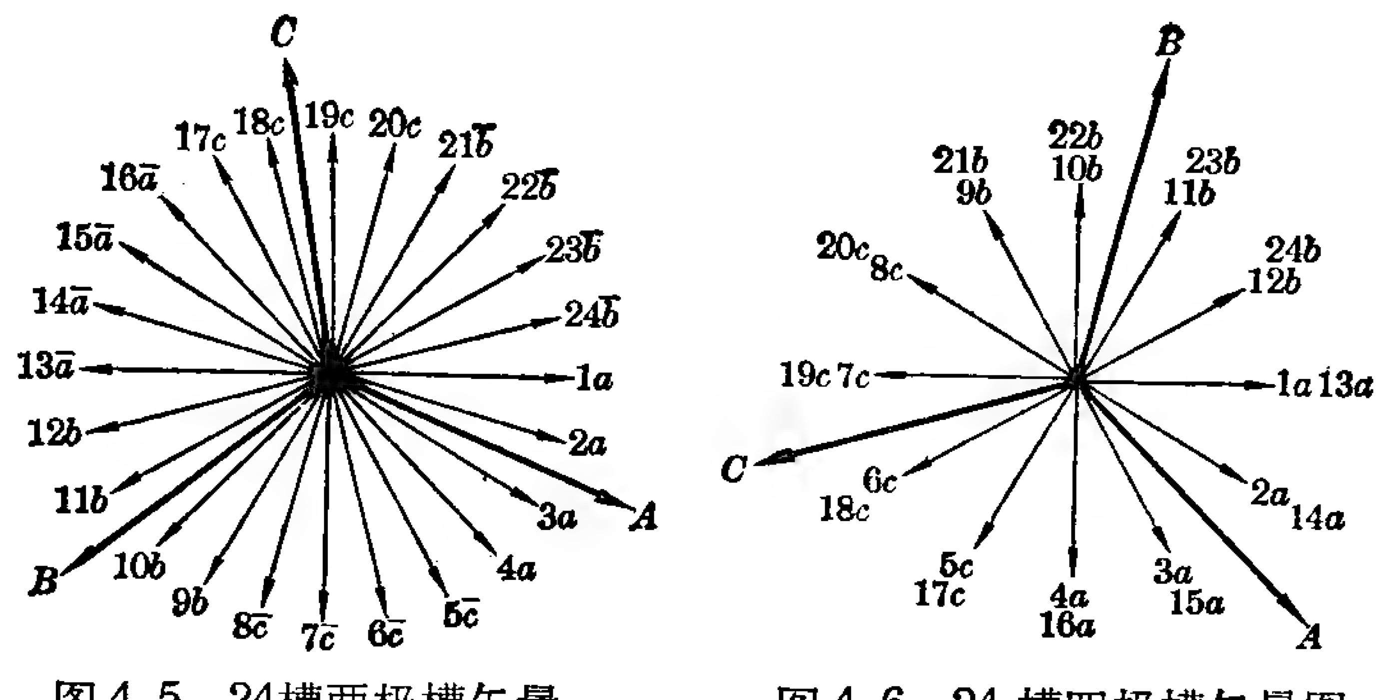


图 4-5　24槽两极槽矢量　　　　图 4-6　24 槽四极槽矢量图

3）按照各槽相号不变原则，对照 2 极相号，在 4 极槽矢量图上标出各槽相号；

4）根据图 4-6 上各相矢量分布情况，取定三个相矢量方向如图。以三个相矢量为准，确定各槽相号均为正；

5）检查三相情况，显然是对称的；

6）列出全部绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
2　极	a	a	a	a	−c	−c	−c	−c	b	b	b	b	−a	−a	−a	−a	c	c	c	c	−b	−b	−b	−b
4　极	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b	a	a	a	a	c	c	c	c	b	b	b	b
反向指示					*	*	*	*					*	*	*	*					*	*	*	*

7）计算绕组系数：

2 极时，$q=\dfrac{24}{2\times3}=4,\ \alpha=15°$

$$K_{d2}=\frac{\sin\dfrac{4\times15°}{2}}{4\times\sin\dfrac{15°}{2}}=\frac{\sin30°}{4\sin7.5°}=\frac{0.5}{4\times0.13}$$

$$=\frac{0.5}{0.52}=0.961$$

$$K_{d4}=\frac{\sin\frac{4\times30^\circ}{2}}{4\times\sin\frac{30^\circ}{2}}=\frac{\sin60^\circ}{4\sin15^\circ}=\frac{0.866}{4\times0.259}$$

$$=\frac{0.866}{1.036}=0.836$$

取跨距 $y=6$，2 极时短 6 槽，相当于 90° 电度角；4 极时正好满距，所以$K_{y2}=\cos45^\circ=0.707$，$K_{y4}=1$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy2}=0.961\times0.707=0.68$$

$$K_{dy4}=0.836\times1=0.836$$

比较图 4-5 和图 4-6 可知，该绕组方案也是"反转向方案"。

从以上二例可看出，倍极比为 2:1 的双速单绕组一般都是利用庶极接法获得的。

利用反向法实际上还可获得高于 2:1，例如 4:1 倍极比的双速单绕组，下面举一个 36 槽 2/8 极的例子。

【例三】一只定子 36 槽电动机，试利用反向法排出 2/8 极双速单绕组方案。

这个例子我们分别按以 2 极作基准极和以 8 极作基准极两种情况来排绕组。

(一) 以 2 极作基准极的绕组方案：

1) 按第三章所述方法排出 2 极时绕组如图 4-7；

2) 画出 8 极槽矢量图，$\alpha=\frac{8\times180^\circ}{36}=40^\circ$，并按照相号不变的原则标出各槽相号如图 4-8；

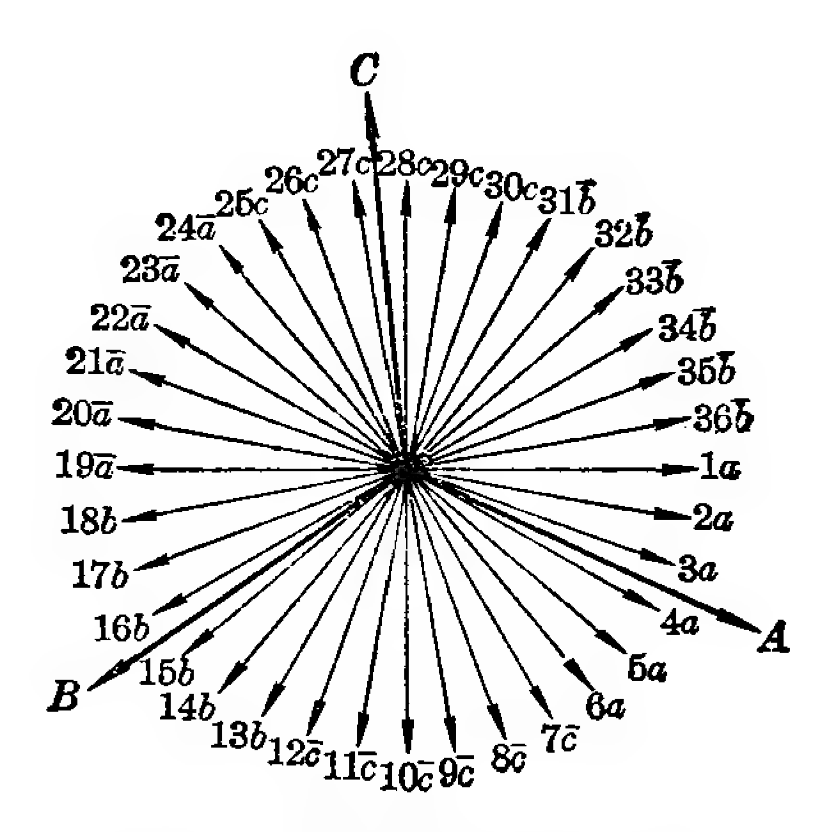


图 4-7　36 槽两极槽矢量图

3) 根据一相所有矢量分布情况取定三个相矢量方向(见图 4-8)，据此确定各相号之正负，标于图上。

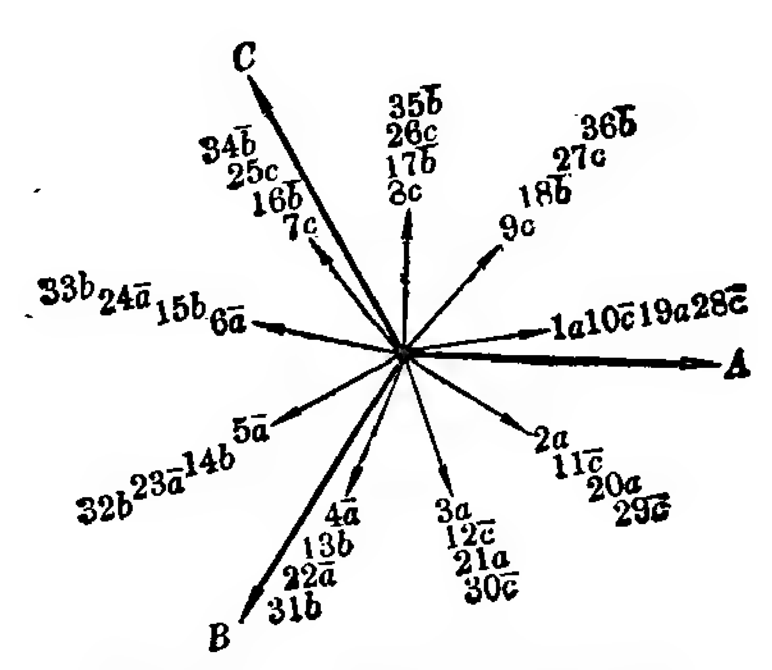


图 4-8　36 槽八极槽矢量图

取定相矢量方向应尽量考虑使由此决定的各槽正负号能按组连号，以便于绕制线圈。图 4-8 中如直观上取 A、B、C 三个相矢量，应分别选在 3、4 槽，6、7 槽和 9、10 槽的中间，但这样选定之后，各相所含全部槽的正负号较乱，例如 A 相各槽正负号为 $\bar{1}$、2、3、4、5、$\bar{6}$、$\overline{19}$、20、21、22、23、$\overline{24}$，现按

图 4-8 中所取的相矢量方向，A 相各槽正负号为 1、2、3、$\bar{4}$、$\bar{5}$、$\bar{6}$、19、20、21、$\overline{22}$、$\overline{23}$、$\overline{24}$，这样安排绕制线圈就比较方便；

4）检查三相情况，显然对称；

5）列出全部绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2　极	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
8　极	a	a	a	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-b$	$-b$	$-b$
反向指示				*	*	*	*	*	*							*	*	*
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
2　极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
8　极	a	a	a	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-b$	$-b$	$-b$
反向指示	*	*	*							*	*	*	*	*	*			

6）计算绕组系数。因为 8 极时一相矢量分布情况和 2 极时差别很大，公式计算不适用，所以用矢量图来计算分布系数。画出 2、8 极时一相矢量分布情况如图 4-9，由图求得：

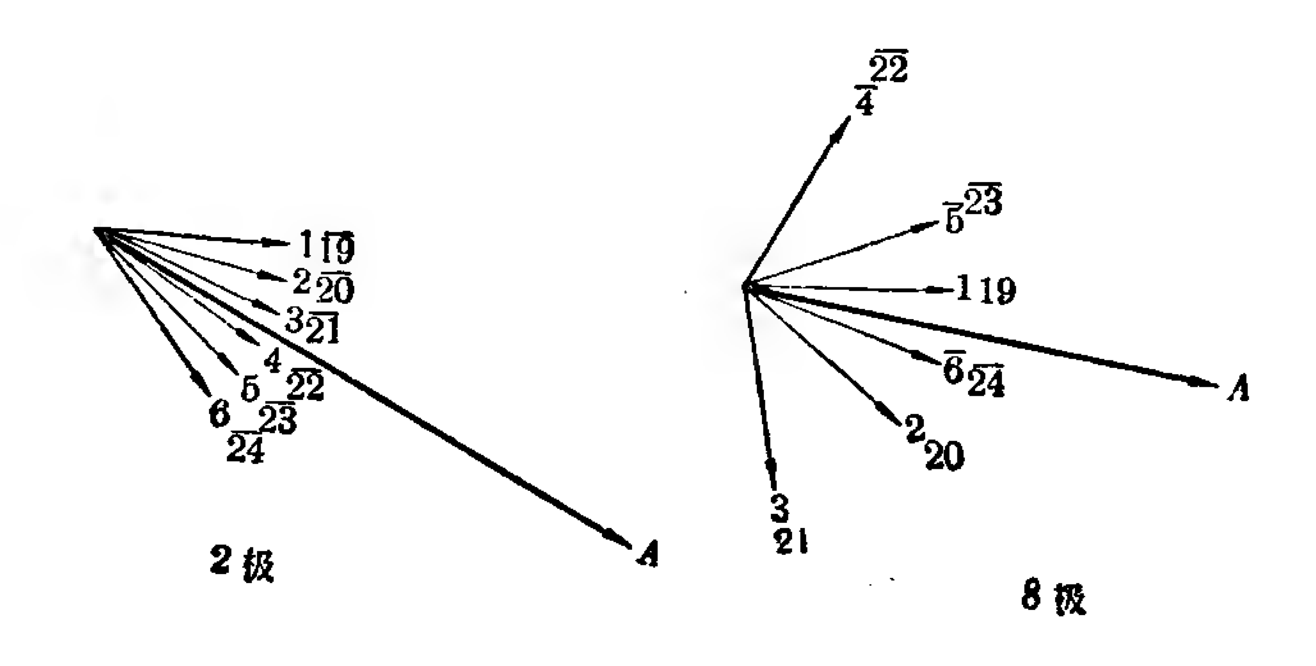


图 4-9　一相矢量分布图

$$K_{d2}=\frac{4\cos 25^\circ+4\cos 15^\circ+4\cos 5^\circ}{12}$$

$$=\frac{4\times0.906+4\times0.966+4\times0.996}{12}=0.956$$

$$K_{d8}=\frac{4\cos 70^\circ+4\cos 30^\circ+4\cos 10^\circ}{12}$$

$$=\frac{4\times0.342+4\times0.866+4\times0.985}{12}=0.731$$

取跨距 $y=14$。2 极时短 4 槽，相当于 40° 电度角；8 极时长 0.5 槽，相当于 20° 电度角，所以

$$K_{y2}=\cos 20^\circ=0.94$$

$$K_{y8}=\cos 10^\circ=0.985$$

$y=14$ 的跨距数也是接近多极数的满距；对于“满距”这个概念应该从广义上来理解，只要元件的两个边处于异性极的对称相应位置就是满距，而该两异性极是否相邻极则并无关系。通常绕组的满距，元件的两个边间隔是一个极距，因而两异性极是相邻的，但在单绕组多速电动机中情况会有变化，例如本例 8 极时如 $y=13.5$ 也是满距，元件两个边间隔为三个极距，两异性极并不相邻。所以产生这种情况，是由于多速电动机的几个极对数 p 相差较大，如按间隔一个极距的满距来取定 y，例如本例中取 $y=5$(8 极也是长 0.5 槽) 则 2 极时短距系数就太小，电机性能就很差了。

绕组系数分别为：

$$K_{dy2}=0.956\times0.94=0.9$$

$$K_{dy8}=0.731\times0.985=0.72$$

此方案在 8 极时，从绕组排列表上看，好象不易看出绕组会形成 8 个极，但如果画出槽电流表和绕组磁势图（取瞬间

$i_a=i_b=\dfrac{1}{2}$, $i_c=-1$)，就可清楚看出绕组将形成8个极。槽电流表如下，绕组磁势图见图4-10。

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
i_a	↑↑	↑↑	↑	↓	↓	↓									↓	↓	↓	↑
i_b									↓	↓	↓	↑	↑↑	↑↑	↑	↓	↓	↓
i_c			↑	↑	↑	↓	↓↓	↓↓	↓	↑	↑	↑						
$i_合$	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑		↓	↓	
	1	1	$1\frac{1}{2}$	1/2	1/2	$1\frac{1}{2}$	2	2	$1\frac{1}{2}$	1/2	1/2	$1\frac{1}{2}$	1	1	0	1	1	0

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
i_a	↑↑	↑↑	↑	↓	↓	↓									↓	↓	↓	↑
i_b									↓	↓	↓	↑	↑↑	↑↑	↑	↓	↓	↓
i_c			↑	↑	↑	↓	↓↓	↓↓	↓	↑	↑	↑						
$i_合$	↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↑		↓	↓	
	1	1	$1\frac{1}{2}$	1/2	1/2	$1\frac{1}{2}$	2	2	$1\frac{1}{2}$	1/2	1/2	$1\frac{1}{2}$	1	1	0	1	1	0

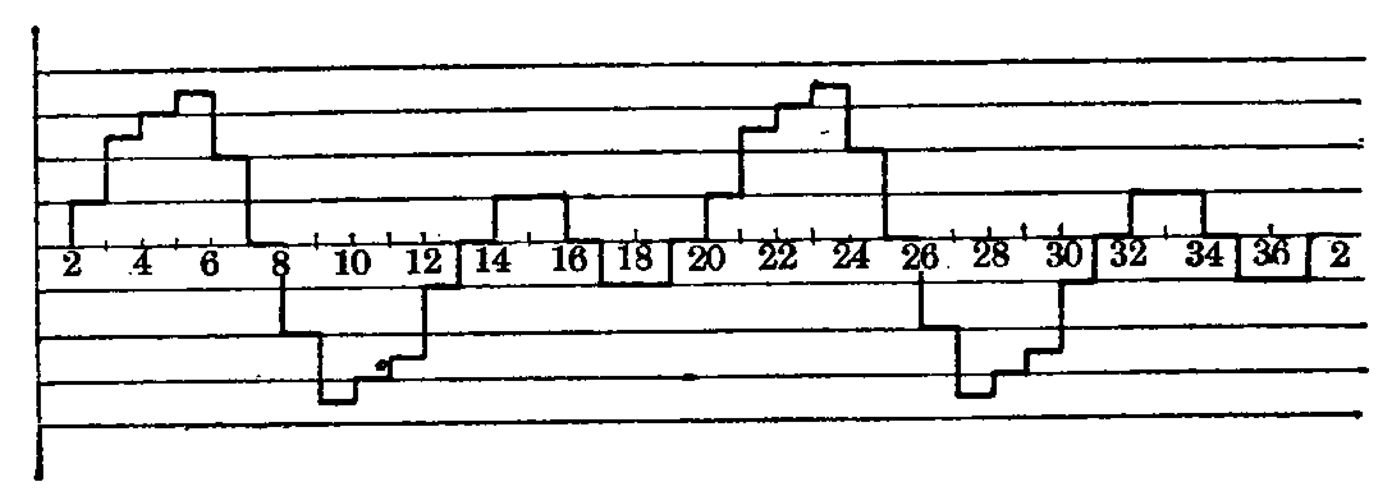


图4-10　绕组磁势图

比较2、8极槽矢量图可知，该绕组方案为"同转向方案"。

(二) 以8极作基准极的绕组方案:

1) 按庶极接法排出8极绕组，其矢量图和图4-4一样;

2）画出 2 极时槽矢量图如图 4-11，按照相号不变原则标出各槽相号；

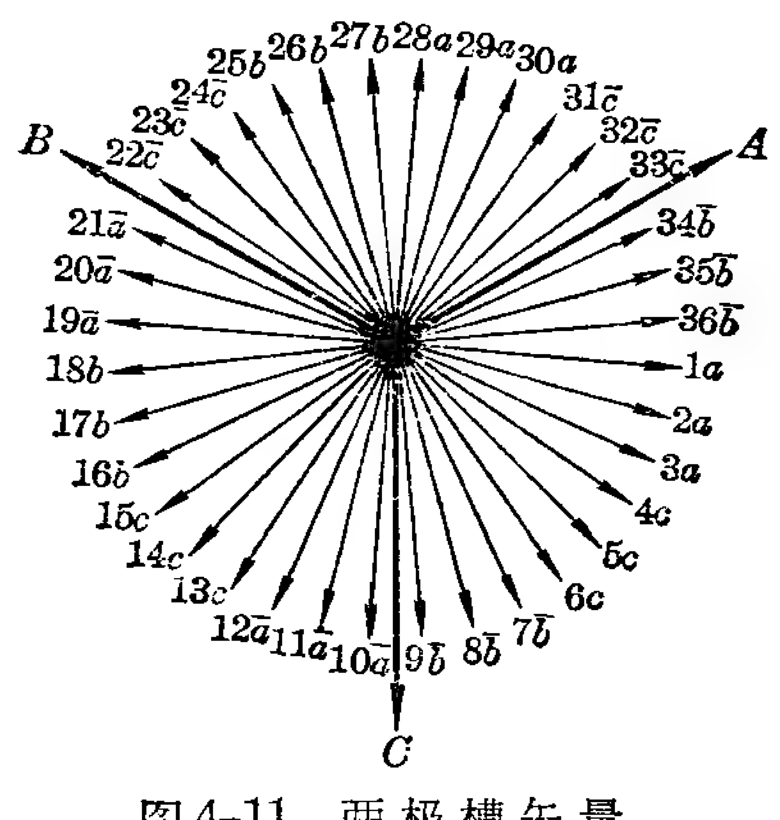


图 4-11　两 极 槽 矢 量

3）取定三个相矢量方向(见图 4-11)，标出各相号之正负；

4）检查三相，是对称的；

5）列出绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
2　极	a	a	a	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	b	b	b
反向指示							*	*	*	*	*	*						

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
2　极	$-a$	$-a$	$-a$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-b$	$-b$	$-b$
反向指示	*	*	*	*	*	*							*	*	*	*	*	*

6）计算绕组系数，8 极时绕组和例一完全一样，所以 K_{d8}

$=0.844$；2 极时一相矢量分布见图 4-12，则

$$K_{d2}=\frac{4\cos 55^\circ+4\cos 45^\circ+4\cos 35^\circ}{12}$$

$$=\frac{0.574+0.707+0.819}{3}=0.7$$

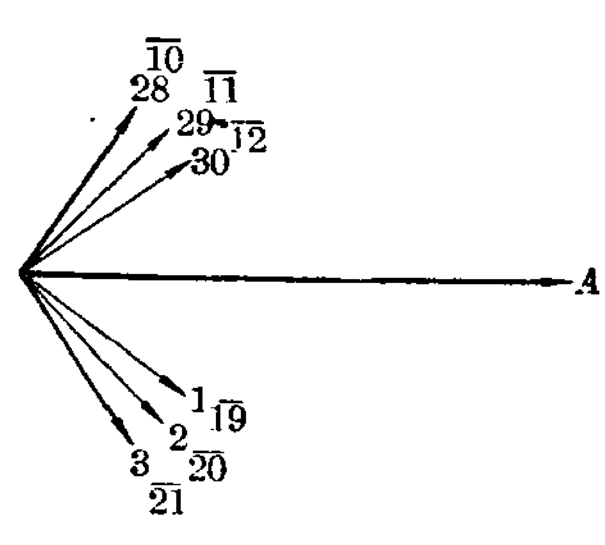


图 4-12　两极时一相矢量分布

取跨距 $y=15$，2 极时短 3 槽，相当于 30° 电度角；8 极时长 1.5 槽，相当于 60° 电度角，所以

$$K_{y2}=\cos 15^\circ=0.966$$

$$K_{y8}=\cos 30^\circ=0.866$$

绕组系数分别为：

$$K_{dy2}=0.7\times 0.966=0.676$$

$$K_{dy8}=0.844\times 0.866=0.731$$

该方案也为“同转向方案”。比较 36 槽2/8极两种绕组方案可知，第一种方案两种极数的绕组系数都较高，尤其是 2 极时更高，因此适用于要求出力较高，尤其是高速出力较高的场合。第二种方案两种极数的绕组系数虽然较低，但较接近，因此适用于要求两种极数时的出力较接近的场合。

（2）非倍极比双速电动机的绕组排列

以上几个倍极比例子，它们的绕组基本上都是正规分布绕组。所谓正规分布绕组是指每相矢量分布是有规则的（每个方向上矢量的槽数相等，各矢量之间夹角相等）。在非倍极比双速电动机绕组中，既用到正规分布绕组，也常常用到非正规分布绕组。

排列非倍极比双速绕组，象前面排列 2/8 极绕组一样可以选少极数作基准极，也可以选多极数作基准极，只要对两种

极数都能排出对称三相绕组就行。但是完全有可能在选某一极数作基准极时能排出对称绕组，选另一极数作基准极时就排不出对称绕组。如果两种情况下都能排出对称绕组，由此得出的两个绕组方案特点也不会相同。最后究竟选用哪个方案，应该根据使用场合的要求，对照两个方案各自的特点（分布系数的高低、磁势波形的好坏）来确定。

下面举例说明非倍极比双速电动机绕组的排列方法。

（一）正规分布绕组：

【例一】 一只定子 36 槽电动机，试利用反向法排出 4/6 极正规分布双速单绕组方案。

1）排出四极绕组，其矢量图见图 4-3；

2）画出 6 极槽矢量如图 4-13 $\left(\alpha=\dfrac{6\times180^\circ}{36}=30^\circ\right)$，标出槽号，并根据 4 极时各槽相号标上相号；

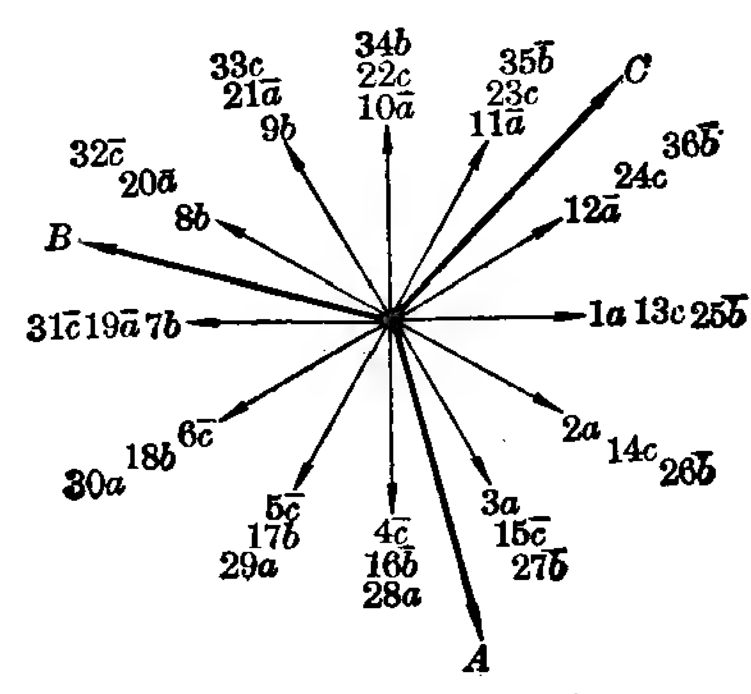


图 4-13 36 槽六极槽矢量

3）取定三个相矢量如图，据此标出各相号的正负。

在这个槽矢量图上取定相矢量方向时无法做到各相槽按组全部连号。在图 4-13 所取的相矢量方向中，B 相的 16、17、18 和 34、35、36 槽，C 相的 13、14、15 和 31、32、33 槽，

其中都有一个槽和另两槽不同号——接法相反，所以绕制线圈时这三只不能连绕；

4）检查三相，是对称的；

5）列出绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	$-c$	$-b$	b	b
反向指示															*		*	*

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	a	a	a	$-c$	$-c$	c	b	$-b$	$-b$
反向指示	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		

6）计算绕组系数：

4 极时 $K_{d4}=0.96$

6 极时一相矢量分布如图 4-14，

$$K_{d6}=\frac{4\cos 75°+4\cos 45°+4\cos 15°}{12}$$

$$=\frac{0.259+0.707+0.966}{3}=0.644$$

取跨距 $y=6$，4 极时短 3 槽，相当于 60° 电度角；6 极时正好满距。所以 $K_{y4}=\cos 30°=0.866$，$K_{y6}=1$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy4}=0.96\times0.866=0.831$$

$$K_{dy6}=0.644\times1=0.644$$

该方案为同转向方案。

【例二】 利用反向法排出定子 36 槽电动机 6/8 极正规分布双速单绕组方案。

定子 36 槽电动机欲排 6/8 极双速正规分布绕组，以 6 极作基准极将排不出对称绕组，因此我们以 8 极作基准极，再反向获得 6 极。36 槽电动机在 8 极时，每极每相槽数 q 为分数$\left(q=\frac{36}{3\times8}=\frac{3}{2}\right)$，形成“分数槽绕组”。这种分数槽绕组的排列方法和整数槽绕组的排列方法基本上是一样的。整个绕组的排列方法如下：

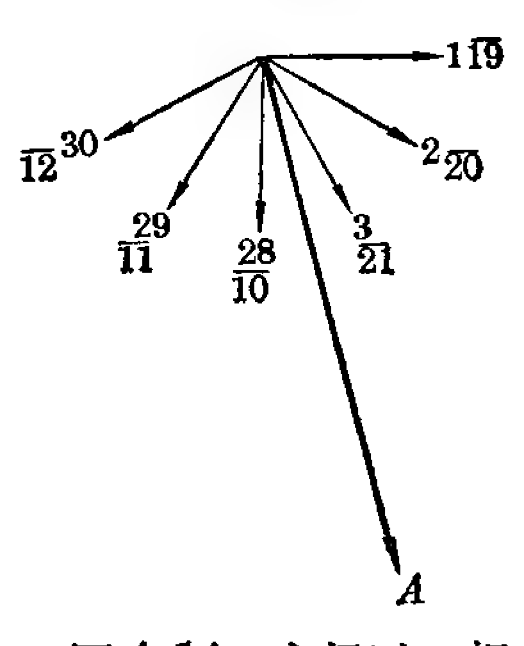


图 4-14 六极时一相矢量分布

1）排出 8 极绕组。8 极时，每相槽数仍为 12，12 个槽分布在 8 个极上，各极槽数我们选定为 1、2、1、2、1、2、1、2。现以 A 相为例说明分数槽绕组的排法。如图 4-15，取槽 1 为 A 相第一极，第二极应为两槽，由图中看出必为 5、6 两槽，因为该两槽合成方向正好与槽 1 差

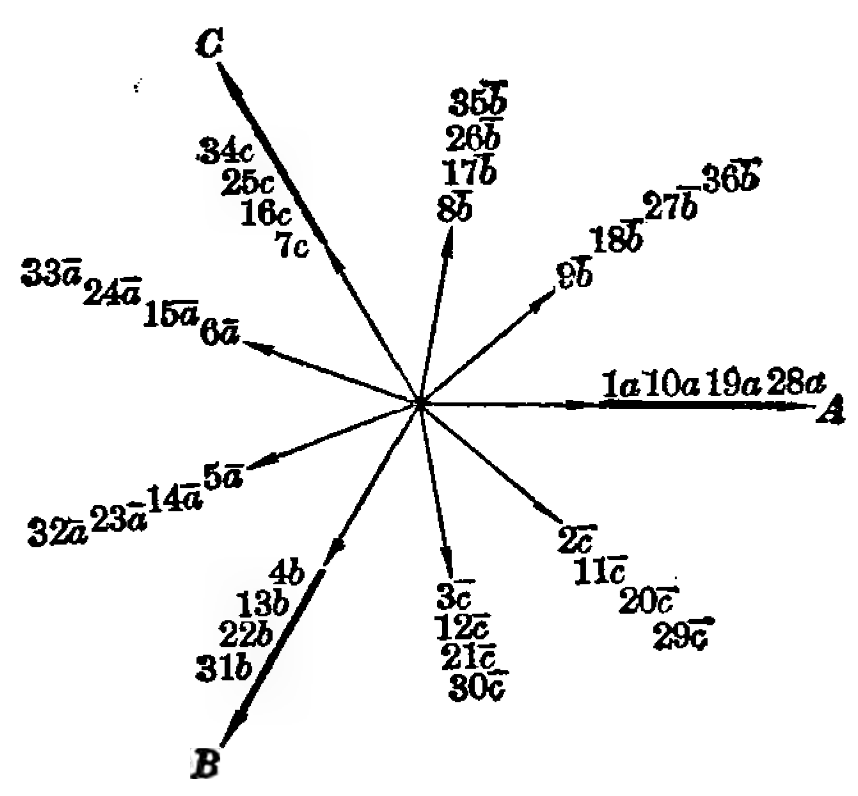


图 4-15 36 槽八极分数槽正规分布绕组槽矢量

180°，满足异性极要求；依次推出第三、四、五、六、七、八极，槽数相应为 10, 14、15, 19, 23、24, 28, 32、33；相矢量 A 的方向取定如图 4-15 中所示，1、10、19、28 四槽为正，余皆负。

B、C 两相绕组排法一样，B 相起始槽为 4，C 相起始槽为 7。得出的绕组，每相全部矢量共有三个方向，相互夹角 20°，每个方向都含 4 槽，构成典型的正规分布绕组。这种典型的正规分布绕组称为 60° 相带绕组（详见第八章），前例中有不少方案都属于 60° 相带绕组，读者可自行对照之；

2）画出 6 极矢量图如图 4-16，并标上各槽相号；

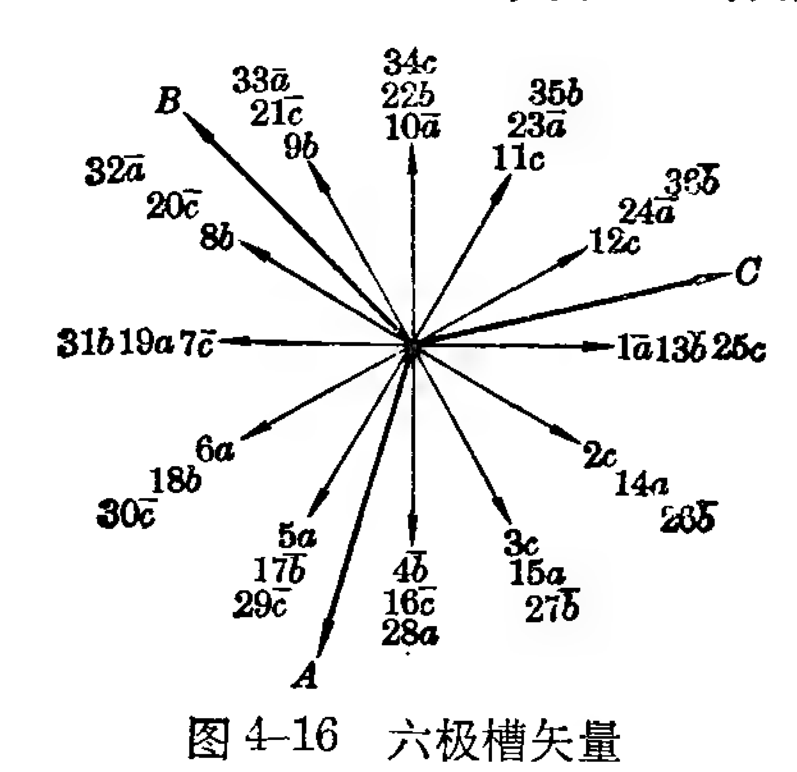


图 4-16　六极槽矢量

图 4-17　6/8 极一相槽矢量分布

(a) 八极；(b) 六极

3）取定三个相矢量方向如图 4-16，确定各相号正负；

4）检查三相对称；

5）列出绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$
6　极	$-a$	c	c	$-b$	a	a	$-c$	b	b	$-a$	c	c	$-b$	a	a	$-c$	$-b$	b
反向指示	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
8　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$
6　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	b	$-b$
反向指示																	*	

6）计算绕组系数：8、6 极一相矢量分布如图 4-17(*a*)、(*b*)，则

$$K_{d8}=\frac{8\cos 20^\circ+4}{12}=\frac{2\times 0.94+1}{3}=0.96$$

$$K_{d6}=\frac{4\cos 75^\circ+4\cos 45^\circ+4\cos 15^\circ}{12}=0.644$$

该方案中 8 极为正规 60° 相带绕组，因此分布系数也可以用公式计算，不过由于是分数槽绕组 $\left(q=\frac{a}{b}=\frac{3}{2}\right)$，因此计算时应令公式中 $q=3$，并且 $\alpha=\frac{2p\cdot 180^\circ}{z_1\cdot b}=\frac{8\times 180^\circ}{36\times 2}=20^\circ$；

$$K_{d8}=\frac{\sin\frac{3\times 20^\circ}{2}}{3\sin\frac{20^\circ}{2}}=\frac{\sin 30^\circ}{3\sin 10^\circ}$$

$$=\frac{0.5}{3\times0.1736}=0.96$$

取跨距 $y=5$，6 极时短 1 槽，相当 30° 电度角；8 极时长 0.5 槽，相当 20° 电度角，所以 $K_{y6}=\cos 15°=0.966$，$K_{y8}=\cos 10°=0.985$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy8}=0.96\times0.985=0.946$$

$$K_{dy6}=0.644\times0.966=0.622$$

比较 6、8 极槽矢量图可知，该方案为“同转向方案”。

（二）非正规分布绕组：

以上二例排出了非倍极比 4/6 极、6/8 极正规分布双速电动机绕组。虽然这两个方案有一定优点，但**事物都是一分为二的**，它也存在着一定缺点，主要是 6 极分布系数低引起绕组系数较低。为了不使 6 极时电动机空载电流过大（参见第五章电势平衡公式。空载电流主要用来产生磁通，在匝数一定条件下，绕组系数低时为了在线圈中产生能够平衡电源电压的感应电势所需要的磁通必然增大，从而空载电流也必然增大），就需增加匝数，减小线径，结果在两种极数时的电动机出力都降低。因此如果要求两种极数时的出力比较接近，这两个方案就不大理想，在这种情况下可以采取非正规分布绕组。

非正规分布绕组，就是每相矢量分布不正规的绕组（各矢量方向所含槽数不等或夹角不等）。一般情况下，比之正规分布绕组，非正规分布绕组磁势曲线波形要差些，谐波也多些，因而起动性能相对较差，损耗相对也大，在单速电动机中都不采用。但是上述情况也不是绝对的，毛主席教导我们：“**在一定的条件下，坏的东西可以引出好的结果**”，有时为了兼顾不同极数时的性能和出力，就需要选择这种非倍极比双速电动

机绕组方案(倍极比双速绕组有时也如此)。

根据以上分析可知，对上两例电动机排列非正规分布绕组的基本出发点应该是提高6极分布系数；当然这样做不可避免地会使另一极数时的分布系数降低，结果两种极数的绕组系数就接近，满足了两种极数时出力较接近的要求。下面我们仍以定子36槽4/6极和6/8极电动机为例，说明非正规分布绕组的排法。

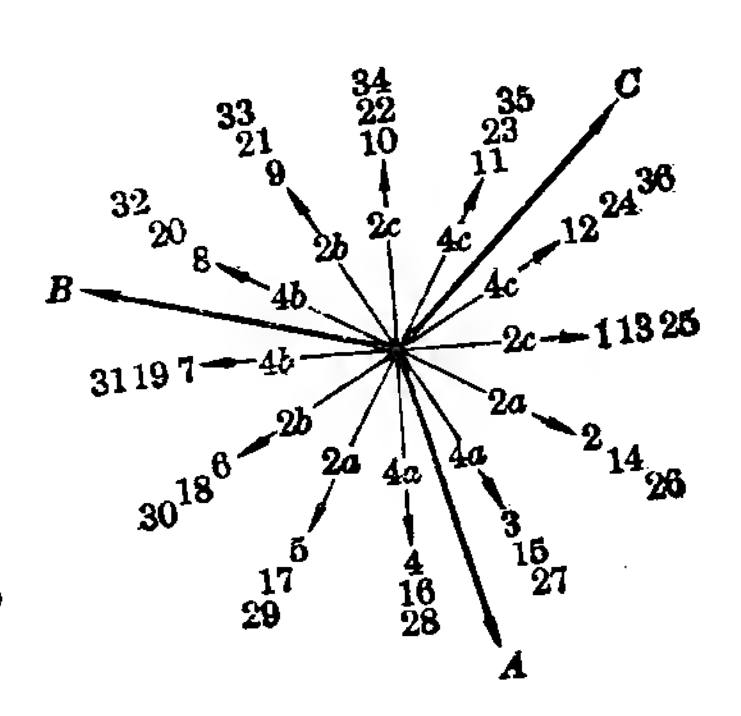


图4-18 矢量分布为2、4、4、2的36槽六极槽矢量

【例一】 定子36槽4/6极非正规分布绕组的排列。

先观察一下图4-14正规分布绕组(前例一)6极时一相矢量分布情况，它共有六个矢量，每个矢量含两槽，换句话说它的矢量分布是2、2、2、2、2、2，共12个槽。由于分布较散，所以分布系数低。为提高分布系数，必须把它改成比较集中一些，例如改成2、4、4、2的不正规分布，如图4-18所示的2*a*、4*a*、4*a*、2*a*，2*b*、4*b*、4*b*、2*b*等。由图4-18可知，要满足这种分布，每一矢量方向(负方向也算在内)的六个槽中应有两种不同相号，其中4个槽为一个相

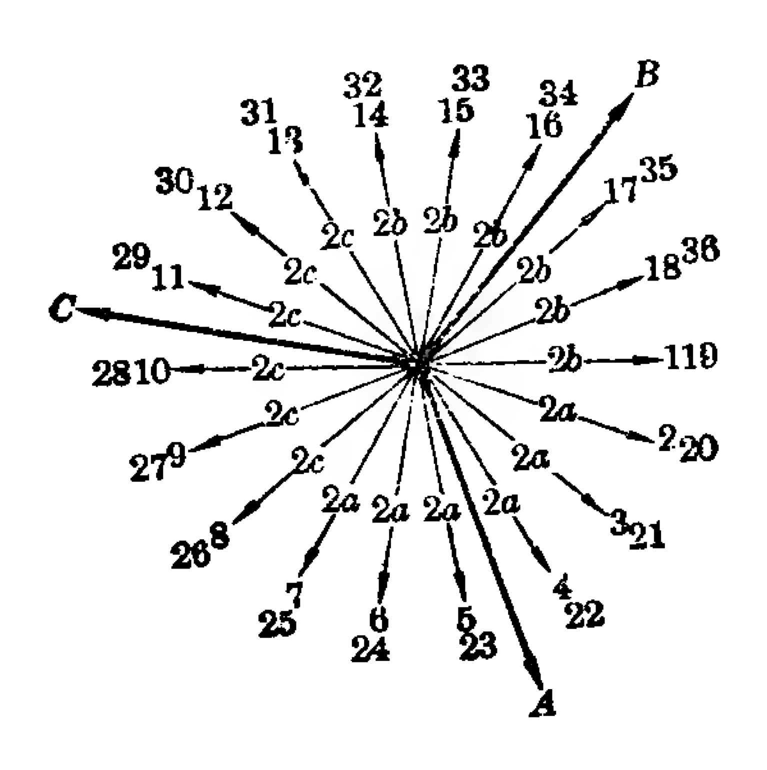


图4-19 矢量分布为2、2、2、2、2、2的36槽四极槽矢量

号，余 2 个槽为另一相号。究竟确定哪一槽为何相，决定于怎样能同时得到一个对称的 4 极绕组。为此，画出 4 极槽矢量图，并取其矢量分布为 2、2、2、2、2、2（原为 4、4、4），如图 4-19。

现以 A 相为例看它应占哪 12 个槽号。同时观察图 4-18 和图 4-19，两图中在取定的 A 相矢量方向上，2、3、4、5 四槽是共有的，因此此四槽马上可确定应为 A 相。再观察图 4-19 中，20、21、22、23 四槽也可取为 A 相，看图 4-18 该四槽也可取为 A 相，不过对 4 极而言应反向。这样，八个槽已取定，在图 4-19 中四个矢量方向上每个方向都已取足 $2a$。再继续在另两个矢量方向上取定四槽。看图 4-19，6、24 两槽也可取为 A 相，但看图 4-18 知该两槽不可能成为 A 相，所以应否定。再进一步看 15、33 两槽，4 极时可取为 $\bar{a}$，而图 4-18 中该两槽也可成为 A 相，不过 15 槽对 4 极而言应反向。同理，16、34 两槽也可取为 A 相，4 极时均为负，6 极时 16 槽反向。至此 A 相 12 个槽就取定（取槽相号时，在可能情况下，尽量使一相所占槽连号，以便于绕制线圈）。

再取 B 相的 12 个槽。同时观察图 4-18 和图 4-19 可看到，24、25、26、27 四槽是共有的（两种极数时均为负）；此外，6、7、8、9 四槽也共有，可取为 B 相，不过变极时应反向。这样八个槽就取定。在图 4-19 中四个矢量方向上都已取足 $2b$，余下两个矢量方向需要从中再取定四槽。看图 4-19 中 14、32 两槽可取为 B 相，再看图 4-18 该两槽也可取为 B 相，不过 14 槽在变极时应反向。同理 1、19 两槽也可取为 B 相，1 槽在变极时应反向。至此 B 相 12 个槽也完全取定。

对 C 相来说，同时观察图 4-18 和 4-19，可立即取定 10、11、12、13 和 28、29、30、31 八槽，其中 28、29、30、31 四槽

在变极时应反向。图 4-19 中余下两个矢量方向上还有八个槽，先看 9、27 两槽，图 4-19 中可取为 C 相，但看图 4-18 知该两槽不可能成为 C 相。再看其反方向的 18、36 两槽，对 4、6 极下均可取为 C 相，但 36 槽在变极时应反向。同样情况图 4-19 另一矢量方向上 8、26 两槽不能取为 C 相，其反方向的 17、35 两槽可取为 C 相，其中 35 槽在变极时反向。

这样综合 4、6 极情况取定的各槽相号，就可保证在两种极数时都能得到对称绕组。

以上排列方法可以用三句话来概括：即“兼顾两极，综合平衡，都要对称”。由以上得出的绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	b	a	a	a	a	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	c	c	c	c	b	$-a$	$-a$	$-c$	$-c$
6　极	$-b$	a	a	a	a	b	b	b	b	c	c	c	c	$-b$	a	a	$-c$	$-c$
反向指示	*					*	*	*	*					*	*	*		
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	b	a	a	a	a	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	c	c	c	c	b	$-a$	$-a$	$-c$	$-c$
6　极	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	c
反向指示		*	*	*	*					*	*	*	*				*	*

4 极时分布系数

$$K_{d4}=\frac{4\cos 50^\circ+4\cos 30^\circ+4\cos 10^\circ}{12}$$

$$=\frac{0.643+0.866+0.985}{3}=0.83;$$

$$K_{d6}=\frac{4\cos 45^\circ+8\cos 15^\circ}{12}$$

$$=\frac{0.707+2\times0.966}{3}=0.88。$$

取跨距 $y=6$，4 极时短 3 槽，相当 60° 电度角；6 极时满距，所以 $K_{y4}=\cos 30°=0.866$，$K_{y6}=1$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy4}=0.83\times0.866=0.72$$

$$K_{dy6}=0.88\times1=0.88$$

与前例相比，可见 6 极绕组系数大为提高，4 极时相应降低，从而使两者比较接近。

比较 4、6 极时槽矢量图可知，该方案为"反转向"方案。

【例二】 定子 36 槽 6/8 极非正规分布绕组的排列。

排列绕组的基本出发点也是提高 6 极分布系数。为此，将 6/8 极正规分布绕组中 6 极每相矢量分布由 2、2、2、2、2、2（见图 4-17）改成 2、4、4、2 的不正规分布，如图 4-20。此种分布也要求每个矢量方向六个槽中有两种不同相号，4 个槽一个相号，余 2 槽为另一相号。8 极每相矢量分布也由 4、4、4

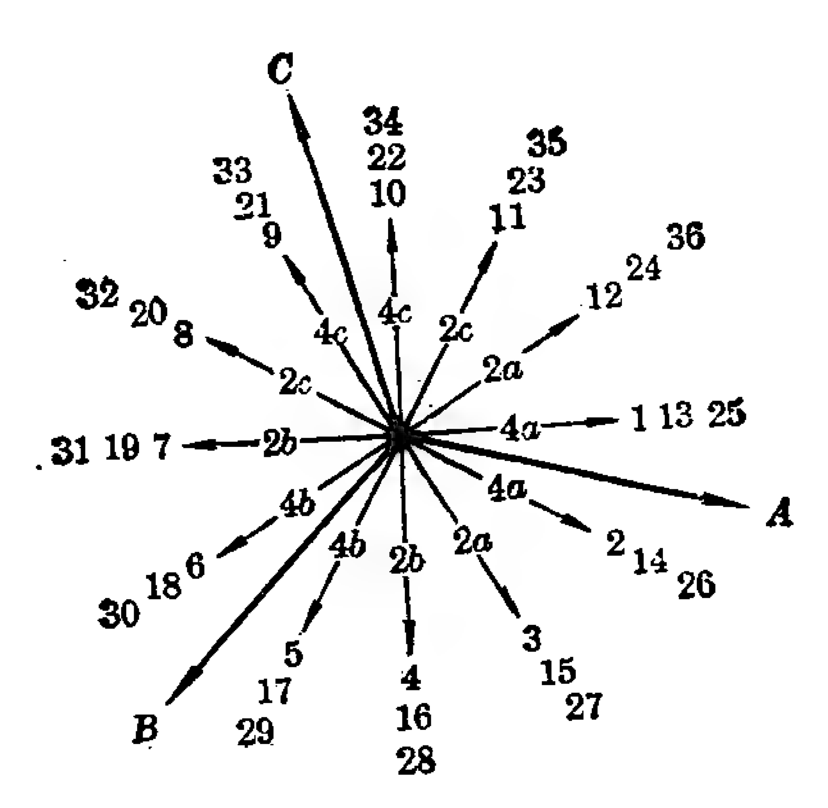


图 4-20 非正规分布 6/8 极绕组六极时的分布

改为 2、2、2、2、2、2，如图 4-21（图中槽电势的负向以虚线表示）。

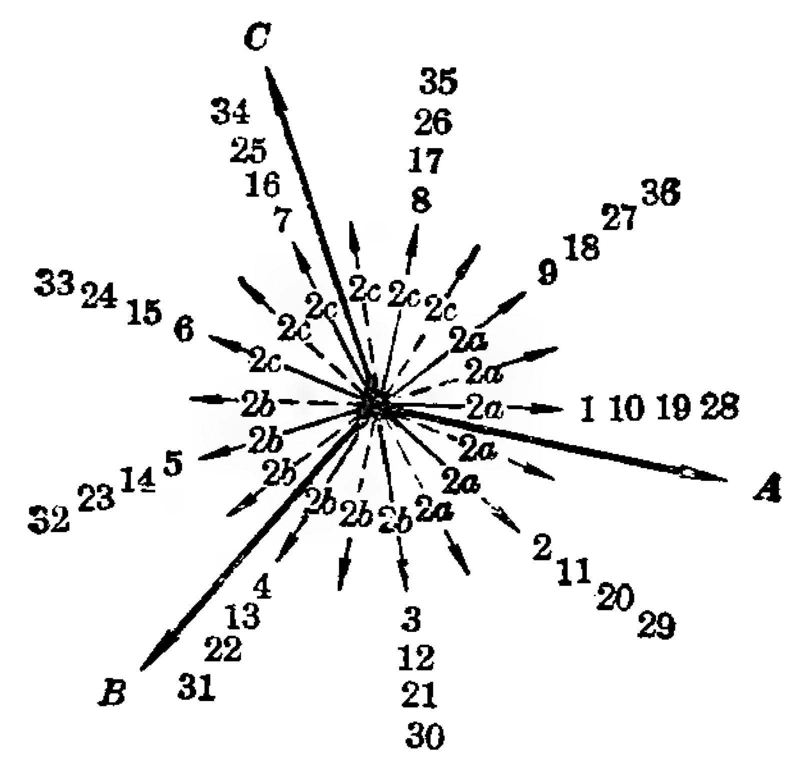


图 4-21　非正规分布 6/8 极绕组八极时的分布

确定各相应占槽号的原则也是“兼顾两极，综合平衡，都要对称”。先看 A 相情况，同时观察图 4-20 和图 4-21 可知 1、2，6、7 四槽是共有的，变极时不反向；19、20，24、25 四槽也可取为 A 相，变极时反向。这样，图 4-21 中 A 相尚剩两个矢量方向，先看一个矢量方向上的 5、14、23、32 四槽，观察图 4-20 知 5 和 23 两槽不可能取为 A 相；14、32 两槽可取为 A 相，但 14 槽变极时应反向。最后一个矢量方向上四个槽中 18、36 已不能取为 A 相，因此只能取 9、27 两槽为 A 相，其中 9 槽变极时反向。至此 A 相 12 个槽全部取定。

再取 C 相的 12 个槽。3、4，34、35 四槽可取为 C 相，变极时不反向。21、22，16、17 四槽也可取为 C 相，变极时反向。余下两个矢量方向上再取 11、29，15、33 四槽，其中 11、15 两槽变极时反向。

B 相 12 个槽中首先可取定的是 12、13，30、31，18、10，36、28 八槽，其中 12、13、18、28 四槽变极时反向。余下两个

矢量方向上只有5、23和8、26四槽，5和23两槽可取为 B 相，23槽变极时反向；8和26两槽由图4-20看出不可能取为 B 相，取作 C 相则可以，因此须要再作变动，把原取定为 C 相的17、35两槽改取为 B 相，而将8、26两槽取为 C 相，其中17、26两槽变极时反向。如此三个相所占槽就可全部取定，且在两种极数下绕组都达到了对称。所得绕组矢量图见第九章方案17。

分布系数 K_{d6}、K_{d8} 分别等于0.88和0.83。跨距取1—6，6极时短1槽，相当于30°电度角，8极时长0.5槽，相当于20°电度角；所以 $K_{y6}=\cos 15°=0.966$，$K_{y8}=\cos 10°=0.985$。绕组系数分别为：$K_{dy6}=0.88\times0.966=0.85$，$K_{dy8}=0.83\times0.985=0.82$。与前例二比较，两种极数下的绕组系数也接近了。

（三）分裂线圈法及其应用：

在排列非倍极比双速单绕组方案时，可能遇到在某一极

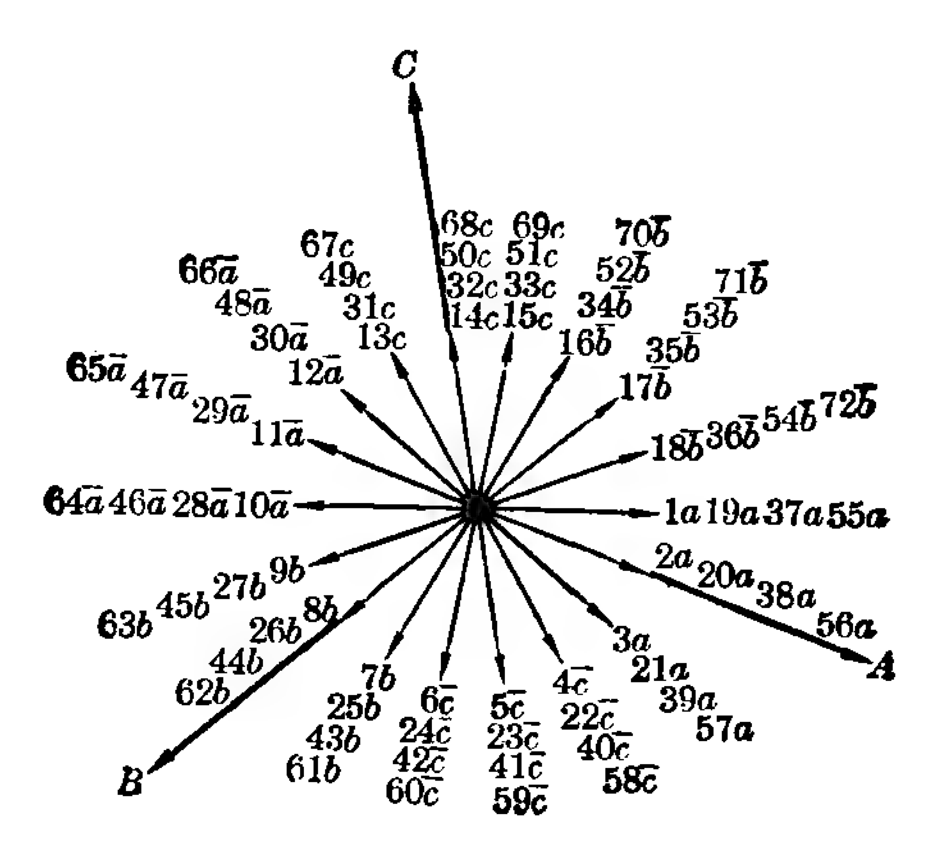


图4-22　6/8极72槽八极时的槽矢量(60°相带，一相分布为8、8、8)

数下排不出对称绕组的情况。此时可以应用分裂线圈的方法来得出对称绕组。下面举例加以说明。

【例】 一只定子 72 槽电动机，欲绕成 6/8 极，试利用反向法排出绕组。

72 槽电动机绕成 6/8 极双速，可以排出正规分布的绕组。各极槽矢量图见图 4-22 和图 4-23。它是以 8 极作基准极排成 60° 相带绕组，再反向获得 6 极。这个方案的缺点在于 6 极时一相矢量分布较散，因而分布系数低($K_{d6}=0.635$)，绕组利用不好。如欲用于两种极数下出力接近的场合就不太合适。

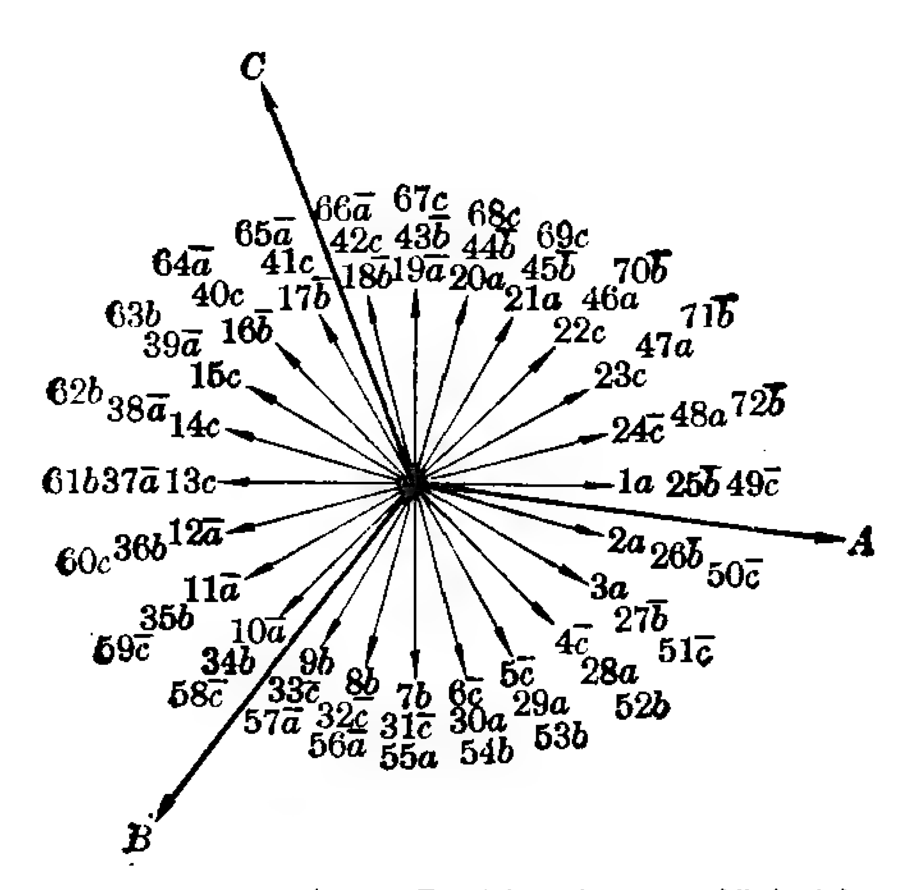


图 4-23 6/8 极 72 槽六极时的槽矢量

为了提高 6 极分布系数，我们将 6 极改成非正规分布绕组。为此应将 8 极每相矢量分布由 8、8、8 改为 4、4、4、4、4、4，得出图 4-24 的槽矢量图。再反向得 6 极如图 4-25。由图可知，6 极每相矢量分布比原来是集中了，但此时 A、B、C 三个相矢量却不能满足对称的要求——B 相矢量幅值大于 A、C 两相矢量幅值，同时三相矢量相位差也不等于 120° (三

个相位差角分别为 112.5°，112.5° 和 135°）。

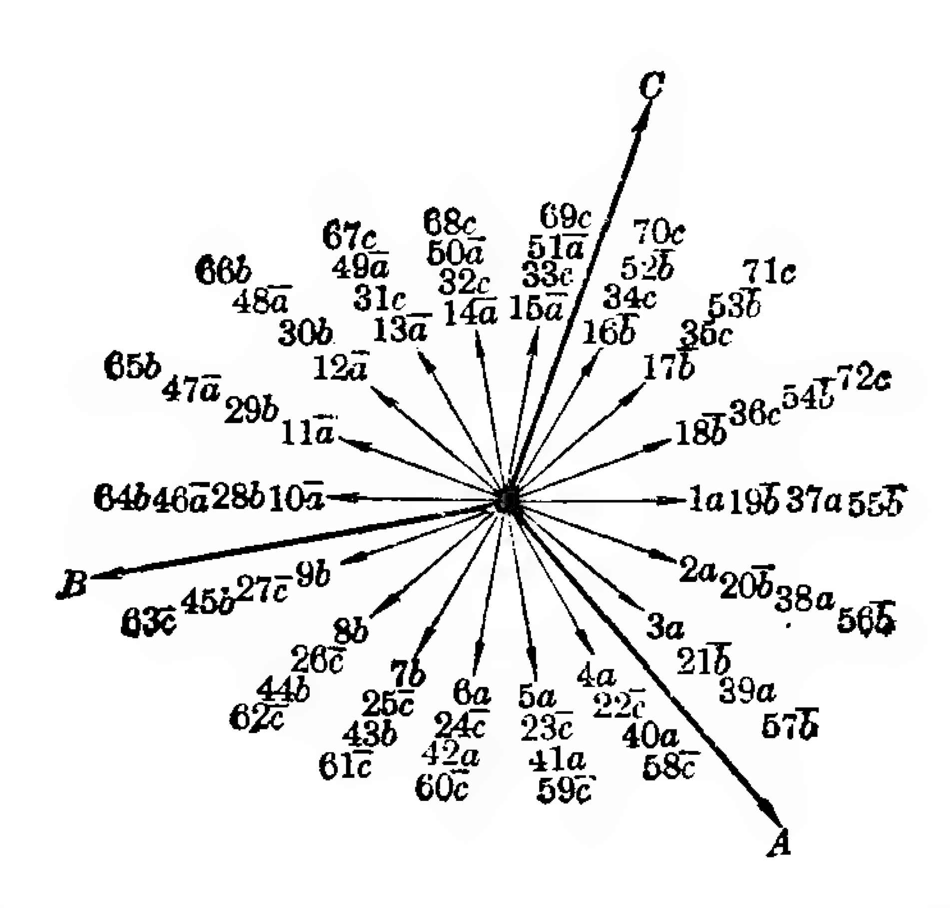


图 4-24　6/8 极 72 槽八极时的槽矢量（一相矢量分布为 4、4、4、4、4、4）

应用分裂线圈法可以在此基础上获得对称绕组，其基本

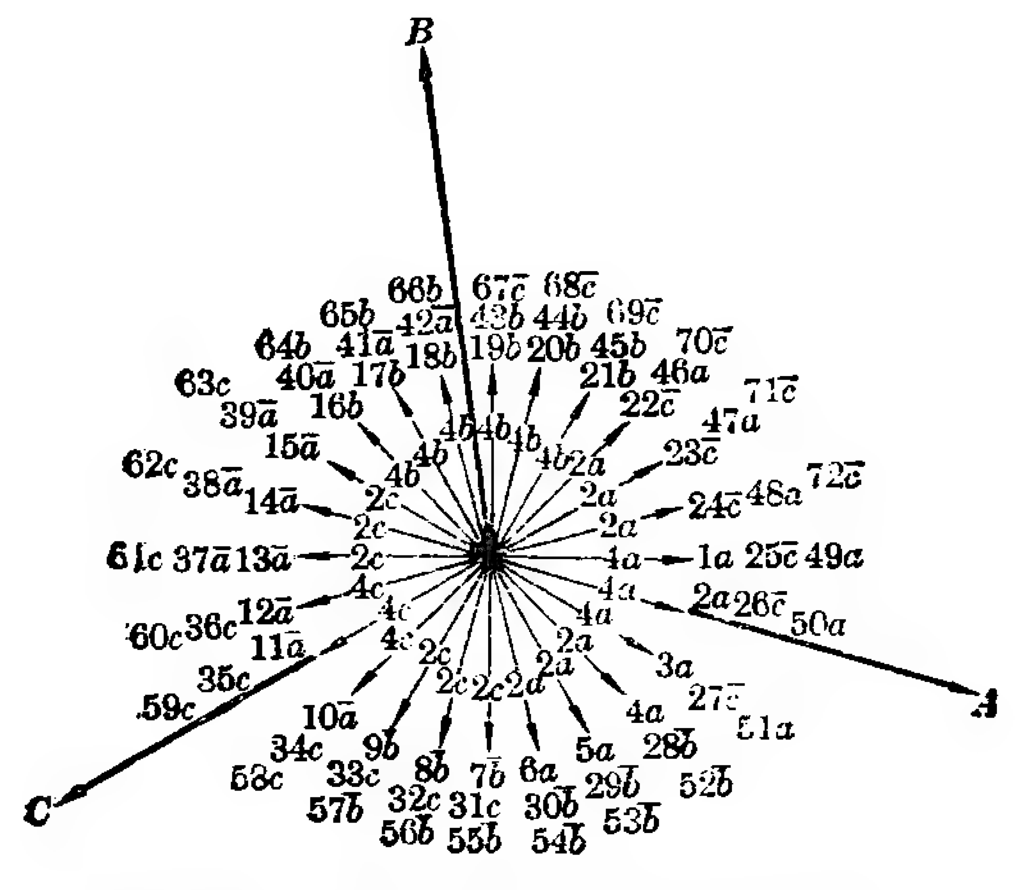


图 4-25　6/8 极 72 槽六极时的槽矢量

构思可以图 4-25 为例来说明。图 4-25 三相不对称的情况是：B 相矢量幅值大，且 A、C 两相矢量夹角为 $135°>120°$。针对这种情况，为了使三相对称，我们可设法减小 B 相矢量的数值(相位不变)；同时设法使 A 相和 C 相的相矢量分别顺时针和反时针转过一定角度——理想情况是 $7.5°$，以减小 A、C 两相矢量夹角使之等于 $120°$ (这样，C、B 和 B、A 相矢量夹角也就等于 $120°$)。

为实现这种构思，采取以下措施：

1) 对于 B 相，因为相位不需变动，因此其矢量分布对于相矢量来说仍必须保持对称。为减小 B 相矢量数值我们设法使其最外层两个矢量方向由含四槽减为含两槽，即矢量分布由 4、4、4、4、4、4 改为 2、4、4、4、4、2。具体办法是使第 45 槽线圈由原来不反向改为反向，第 28 槽线圈由原来反向改为不反向(参考图 4-24 与图 4-25)。改接以后，第 45 槽电势将与第 21 槽电势相抵销，第 28 槽电势将与第 52 槽电势相抵消，因而该两矢量方向上实际的槽电势就由 4 个减为 2 个；

2) 对于 A 相，须使其相矢量顺时针转过约 $7.5°$，同时也应适当减小其数值使和 B 相矢量数值的减小相配合。为此我们将第 10 槽线圈由原来的不反向变成反向 (参考图 4-24 与图 4-25)，使它与该矢量方向上的第 46 槽电势相抵销，从而该矢量方向实际槽电势变为零。另外将第 47 槽线圈一分为二，即将一只线圈拆成两只匝数各等于原来一半的线圈嵌放在同一槽内(一只线圈分裂成两部分，分裂线圈即由此得名)，并且在 6 极时使两半线圈反向串接因而电势抵销(图 4-26 中 47 槽标以 $\pm\frac{a}{2}$ 即为此意)。这样改动后 A 相全部矢量分布就将由图 4-25 中的 2、2、2、4、4、4、2、2、2 变为图 4-26 的

1、2、4、4、4、2、2、2。显然图 4-26 中 A 相矢量数值较之图 4-25 中 A 相矢量数值为小；同时由于原来(图 4-25) 相矢量反时针方向部分矢量所含槽电势数值减少，图 4-27 中 A 相矢量相位较之图 4-25 中 A 相矢量相位必顺时针转过一个角度。按照 1、2、4、4、4、2、2、2 的矢量分布情况，用作图法或数学计算可以证明 A 相矢量相角正好较图 4-25 顺时针转动约 7.5°，同时其数值和变动后的 B 相矢量数值也基本相等；

3）对于 C 相，其措施和 A 相类同，系将第 27 槽线圈由原来不反向改为反向，使与第 63 槽电势抵销而使该矢量方向槽电势为零。同时将第 62 槽线圈分裂为两半，6 极时两半反向串接，电势抵销。如此，C 相全部矢量分布也变为 1、2、4、4、4、2、2、2，较之图 4-25 的相矢量相角正好反时针转过约 7.5°，数值与变动后的 A、B 相矢量数值基本相等。

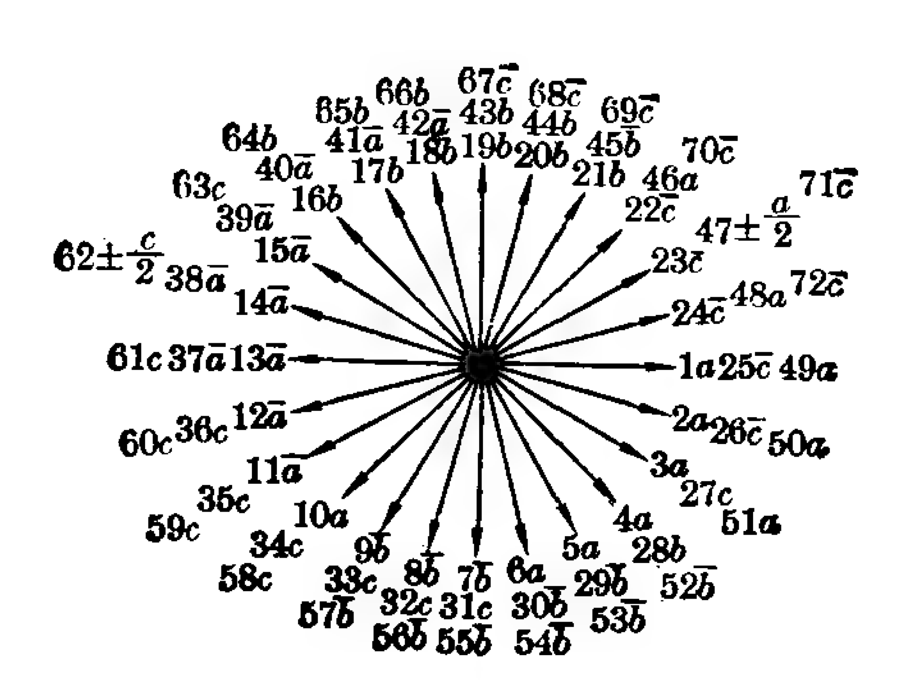


图 4-26　6/8 极 72 槽用分裂线圈法六极时的槽矢量

经过调整以及采用分裂线圈后 6 极的槽矢量图及各相矢量分布见图 4-26 和图 4-27。由图可知，由 8 极反向已可获得一个对称的非正规分布的 72 槽 6 极绕组。

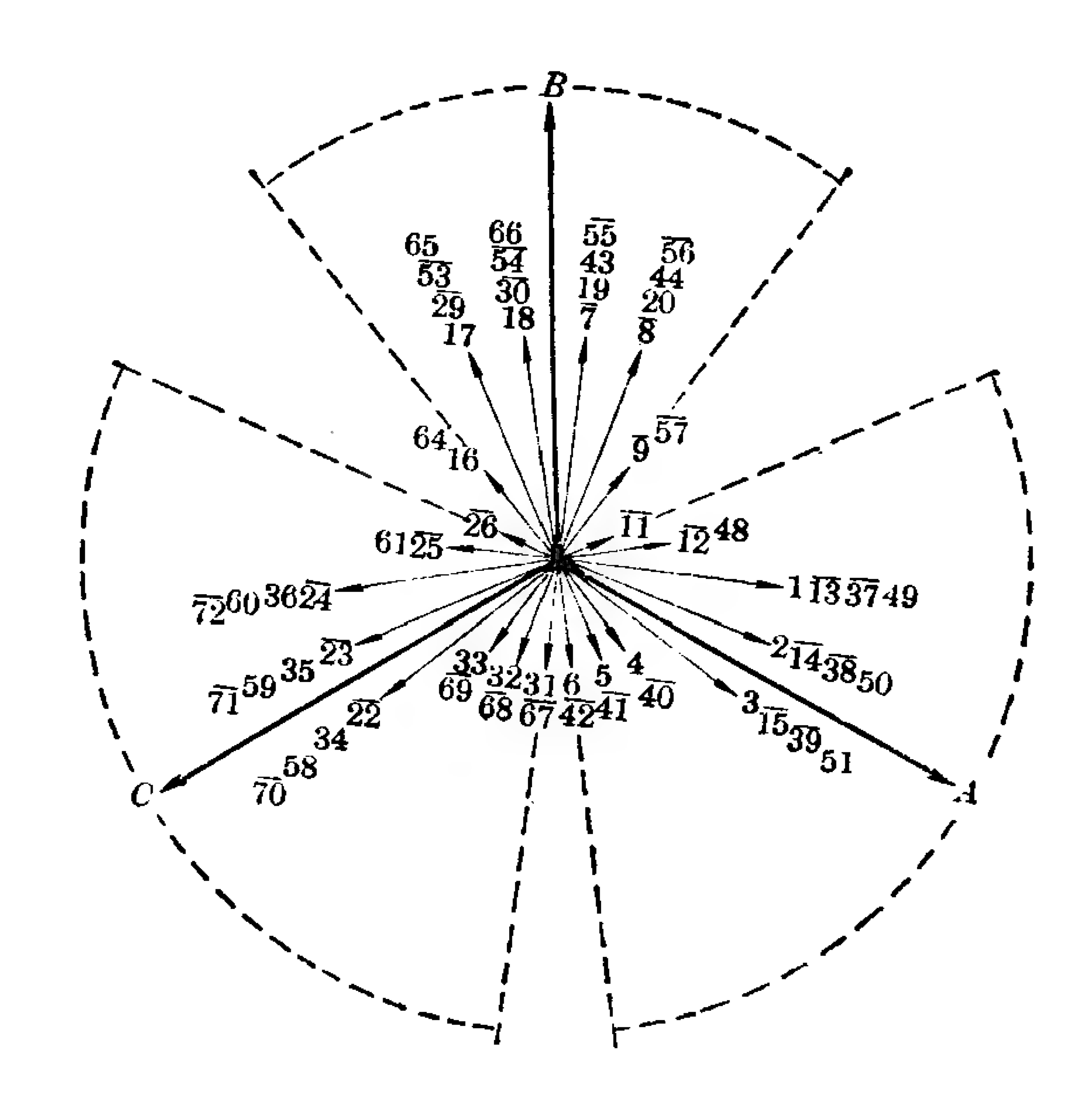


图 4-27　图 4-26 的各相矢量

上述 6/8 极全部绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8　极	a	a	a	a	a	a	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	a	a	a	a	a	a	$-b$	$-b$	$-b$	a	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	b	b	b
反向指示							*	*	*	*						*	*	*

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
8　极	$-b$	$-b$	$-b$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	c	c	c	c	c	c
6　极	b	b	b	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	c	b	$-b$	$-b$	c	c	c	c	c	c
反向指示	*	*	*						*		*	*						

(续表)

槽号	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
8极	a	a	a	a	a	a	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-b$	$-b$	$-b$
6极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	b	b	$-b$	a	$\pm a/2$	a	a	a	a	$-b$	$-b$	$-b$
反向指示	*	*	*	*	*	*			*	*	*1/2	*	*	*	*			

槽号	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72
8极	$-b$	$-b$	$-b$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	c	c	c	c	c	c
6极	$-b$	$-b$	$-b$	c	c	c	c	$\pm c/2$	c	b	b	b	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$
反向指示				*	*	*	*	*1/2	*				*	*	*	*	*	*

在图 4-24 和图 4-26 上可分别求出 8 极和 6 极的分布系数：$K_{d8}=0.831$、$K_{d6}\approx0.77$，和正规分布绕组方案相比，6 极分布系数大为提高，并且两种极数时的分布系数也比较接近了。

通过以上例子，我们可以明了分裂线圈法的应用。第九章方案 14 也是一个应用分裂线圈法(一只线圈分裂成两半，其匝数分别为原匝数的一半以及原匝数的 5/6 和 1/6) 而使 6 极获得对称的绕组方案。

应该强调指出，分裂线圈法总究牺牲了铜、铁，降低了绕组和铁心的利用；因此它只是在不得已的情况下才采用，不宜作为一个普遍的方法来应用。

(3) 三速电动机绕组

利用反向法得到的三速电动机绕组，其排列方法和双速绕组一样，通常也以某一极数作基准极数，通过反向获得另两种极数。下面以一只定子 36 槽电动机为例，说明 4/6/8 极三速绕组的排列方法。

三种极数中我们以4极作基准极数，取其绕组为60°相带绕组，槽矢量图见图4-3。

再画出6极槽矢量图，根据4极时各槽所属相号在6极槽矢量图上标出各槽相号。取定三个相矢量方向之后定出各槽相号的正负。6极绕组矢量图见图4-13。实际上整个4/6极绕组就是前面所述非倍极比双速绕组中正规分布的例一的绕组。

最后考虑8极，我们可以在4极的基础上采用庶极接法来获得。

得到的整个4/6/8极三速绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	$-c$	$-b$	b	b
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	a	a	a	$-c$	$-c$	c	b	$-b$	$-b$
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b

此绕组方案分布系数分别为 $K_{d4}=0.96$，$K_{d6}=0.644$，$K_{d8}=0.844$。跨距取1—6，4极时短4槽，相当于80°电度角，6极时短1槽，相当于30°电度角；8极时长0.5槽，相当20°电度角。所以 $K_{y4}=\cos 40°=0.766$，$K_{y6}=\cos 15°=0.966$，$K_{y8}=\cos 10°=0.985$。

绕组系数分别为：

$$K_{dy4}=0.96\times 0.766=0.735$$

$$K_{dy6}=0.644\times0.966=0.622$$

$$K_{dy8}=0.844\times0.985=0.831$$

第三节　反向变极法的接线方法

以上所有利用反向法获得的双速或三速电动机绕组，一个共同点是变极时每相线圈都有一半电流反向，这个反向可以通过适当的接线变换来实现。

1. 单绕组双速电动机接线方法

单绕组双速电动机用得较多的接线方法有2Y/△，2Y/Y两种，出线头6根。有时也用到2△/Y和2Y/2Y，出线头分别为8根和9根，见图4-28。

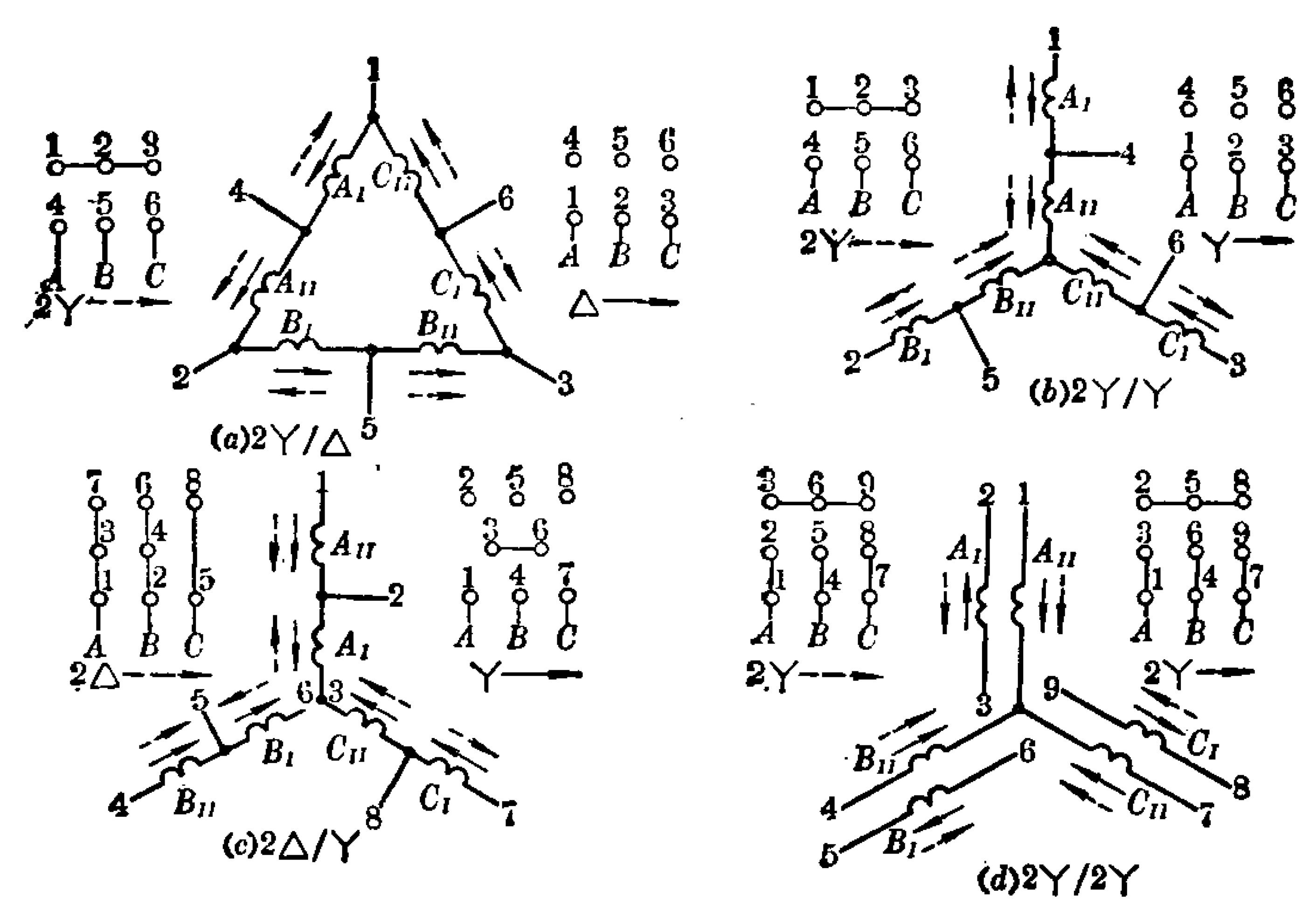


图4-28　双速电动机绕组接法

在图4-28中分别用虚线和实线表示不同接法时的电流方向(为比较起见，Y和△接法一律用电流正方向)。A_I、A_{II}各表示A相的一半线圈，B、C两相也如此。由图4-28可以

清楚看出，不同接法时 A_I、B_I、C_I 反了向，即各相一半线圈反了向。如将图 4-28(c) 的两种接法分别画出如图 4-29，可以清楚看出，2△ 接法变成 Y 接法时 A_I、B_I、C_I 也反了向。

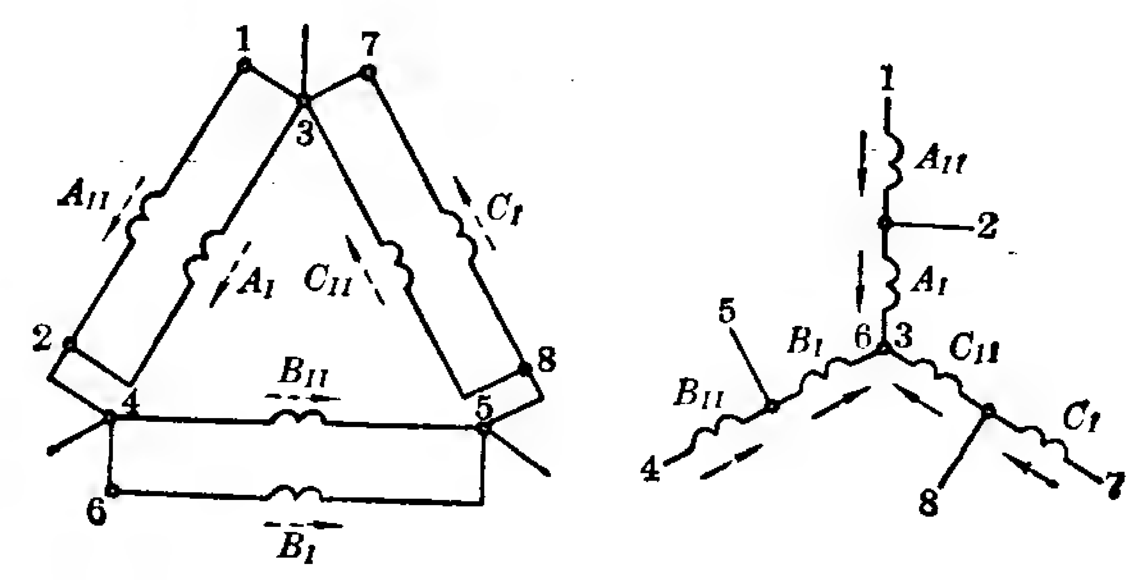


图 4-29　图 4-28(c)的两种接法

下面再举几个绕组方案为例来说明具体接线方法。

【例一】 一台 36 槽 4/8 极双速电动机，其绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	a	a	a	−c	−c	−c	b	b	b	−a	−a	−a	c	c	c	−b	−b	−b
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	a	a	a	−c	−c	−c	b	b	b	−a	−a	−a	c	c	c	−b	−b	−b
8　极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
反向指示				*	*	*				*	*	*				*	*	*

接线方式采用 2Y/△。观察绕组排列表，A 相在 4/8 极时反向的是 10、11、12，28、29、30 六槽，应作为 A_I；不反向的是 1、2、3，19、20、21 六槽，应作为 A_{II}。同理，B_I 应为 16、

17、18, 34、35、36 六槽; B_{II} 应为 7、8、9, 25、26、27 六槽。C_I 应为 4、5、6, 22、23、24 六槽, C_{II} 应为 13、14、15, 31、32、33 六槽。

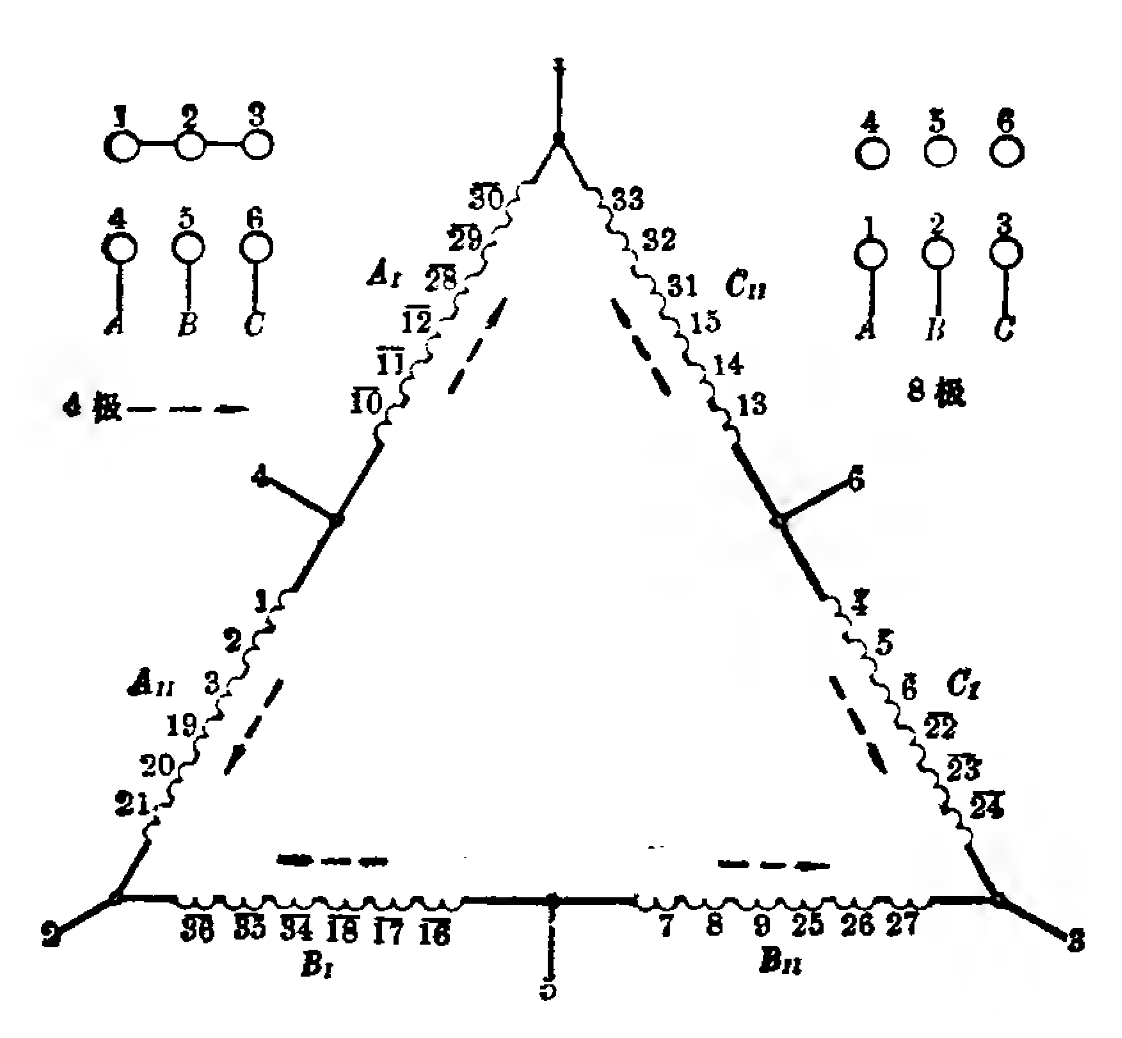


图 4-30　36 槽 4/8 极双速电动机的绕组接法

在图 4-28(*a*) 中画上线圈, 标上所嵌槽号即成图 4-30。图中各线圈的正负应以某一极数时为准, 按照绕组表上相号正负,对照电流正方向确定。设以 4 极为准,此时为 2Y 接法,电流正方向如图 4-30 中虚线所示。绕组表上 *A* 相的 1、2、3, 19、20、21 六槽在 4 极时为正, 因此所嵌的六个线圈应按电流方向顺次写上 1、2、3, 19、20、21。如果 1、2、3 三只线圈连绕, 19、20、21 三只也连绕, 则按此书写次序联结时出线头 4 应接线圈 1 的头(以前我们规定过, 线圈电流自头流至尾为正,相反为负),线圈 3 尾应接线圈 19 头,线圈 21 尾即为出线头 2。 再看 A_I 一半线圈即 10、11、12, 28、29、30六槽, 4 极

时都是负，因此按电流方向应写上 $\overline{10}$、$\overline{11}$、$\overline{12}$，$\overline{28}$、$\overline{29}$、$\overline{30}$。槽号上标以“负”号，即联接时出线头 4 应接至线圈 12 尾，线圈 10 头（10、11、12 三只连绕）接至线圈 30 尾，线圈 28 头即为出线头 1（28、29、30 三只连绕）。*B*、*C* 两相中各线圈正负也可按同法标出。

电流方向为负的线圈的槽号，有时也用另一种书写次序来表示。不写成 $\overline{10}$、$\overline{11}$、$\overline{12}$，$\overline{28}$、$\overline{29}$、$\overline{30}$，而写成逆序，不标以负号，即写成 12、11、10，30、29、28。逆序不标负号或顺序标以负号两者意义相同，都表示联接时线圈电流应自尾流入、头流出。

为了更清楚地表示出图 4-30 所示的绕组接线，我们再以圆图形式画在图 4-31 中以供比较。

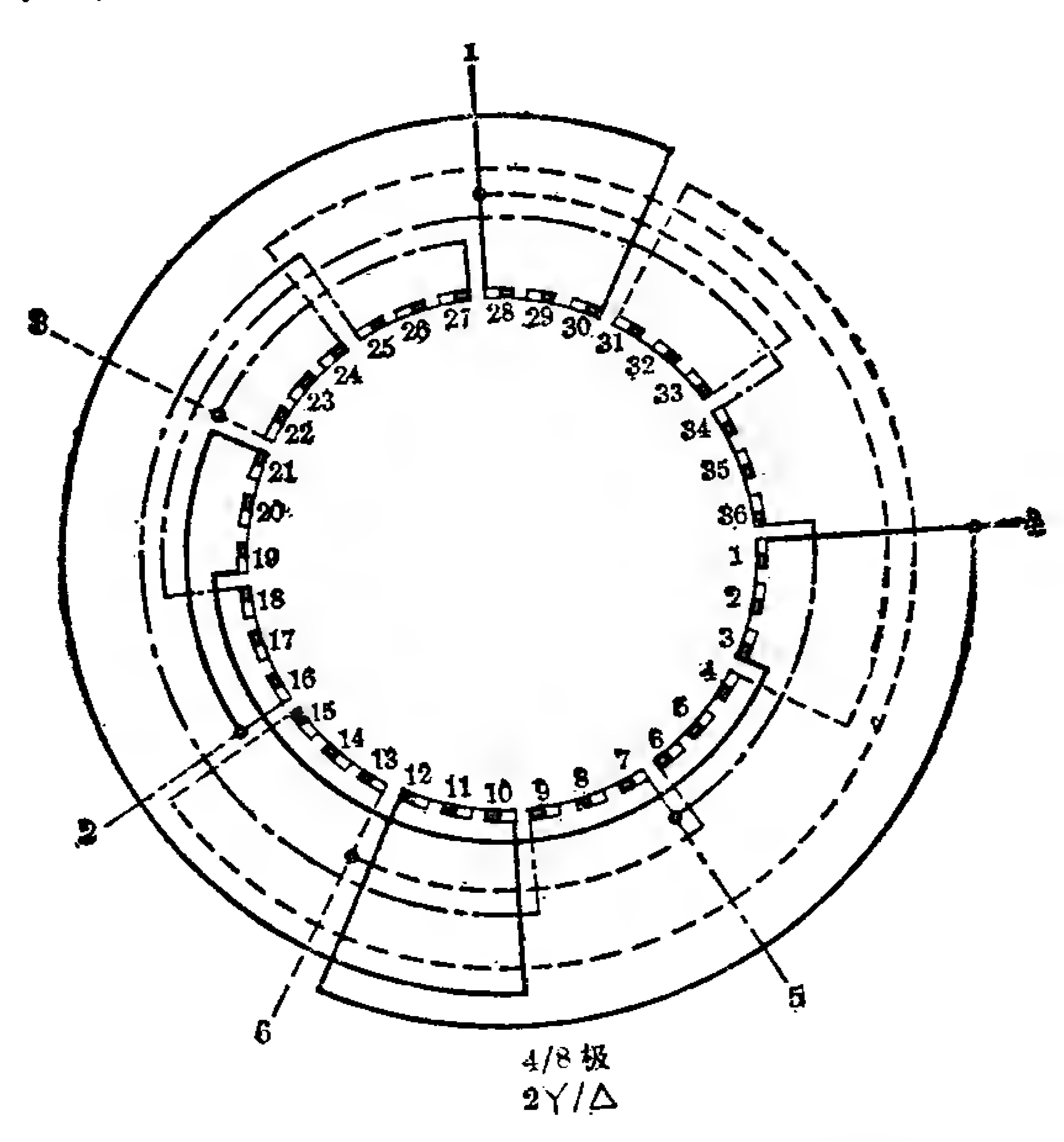


图 4-31　36 槽 4/8 极 2 Y/△ 接线圆图

【例二】 一台 36 槽 4/6 极双速电动机，其绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	$-c$	$-b$	b	b
反向指示															*		*	*

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
6　极	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	a	a	a	$-c$	$-c$	c	b	$-b$	$-b$
反向指示	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*		

接线方法采用 2Y/Y。观察绕组排列表知，A_I 一半线圈应为 19、20、21，28、29、30，A_{II} 为 1、2、3，10、11、12；B_I 为

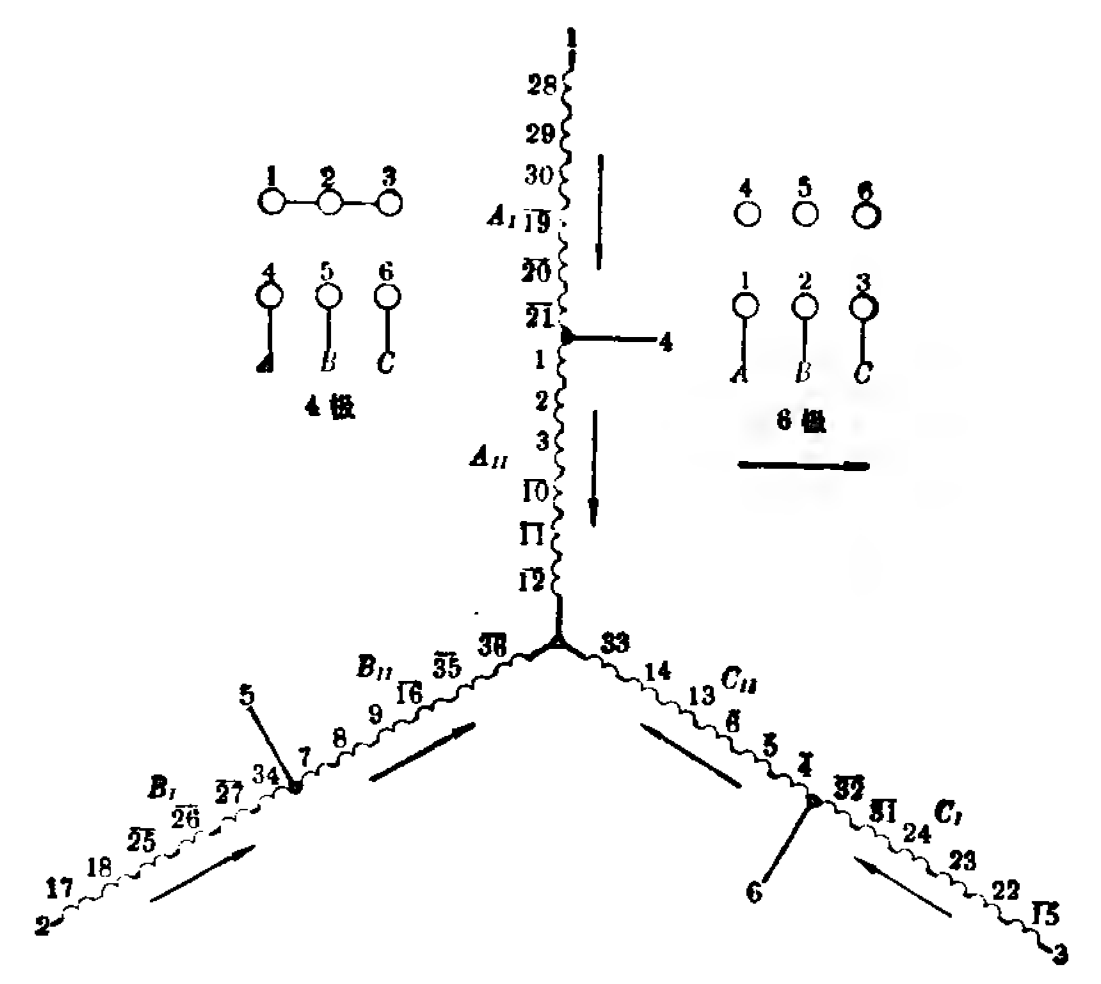


图 4-32　36 槽 4/6 极双速电动机绕组接法

17、18，25、26、27，34，B_{II} 为 7、8、9，16，35、36；C_I 为 15，22、23、24，31、32，C_{II} 为 4、5、6，13、14，33。

书写各槽线圈正负时以 6 极为准，此时为 Y 接法，如图 4-32，电流正方向如实线所示。根据绕组排列表，6 极 *A* 相 28、29、30，1、2、3 六槽线圈为正，10、11、12，19、20、21 六槽为负。*B* 相 17、18、34，7、8、9 六槽为正，25、26、27，16、35、36 六槽为负。*C* 相 13、14，33，22、23、24 六槽为正，4、5、6，15，31、32 六槽为负。

这里注意：*B* 相的 34，16 两槽线圈，*C* 相的 15，33 两槽线圈都是孤立的，因此应单独绕制嵌放。

接线圆图见图 4-33。

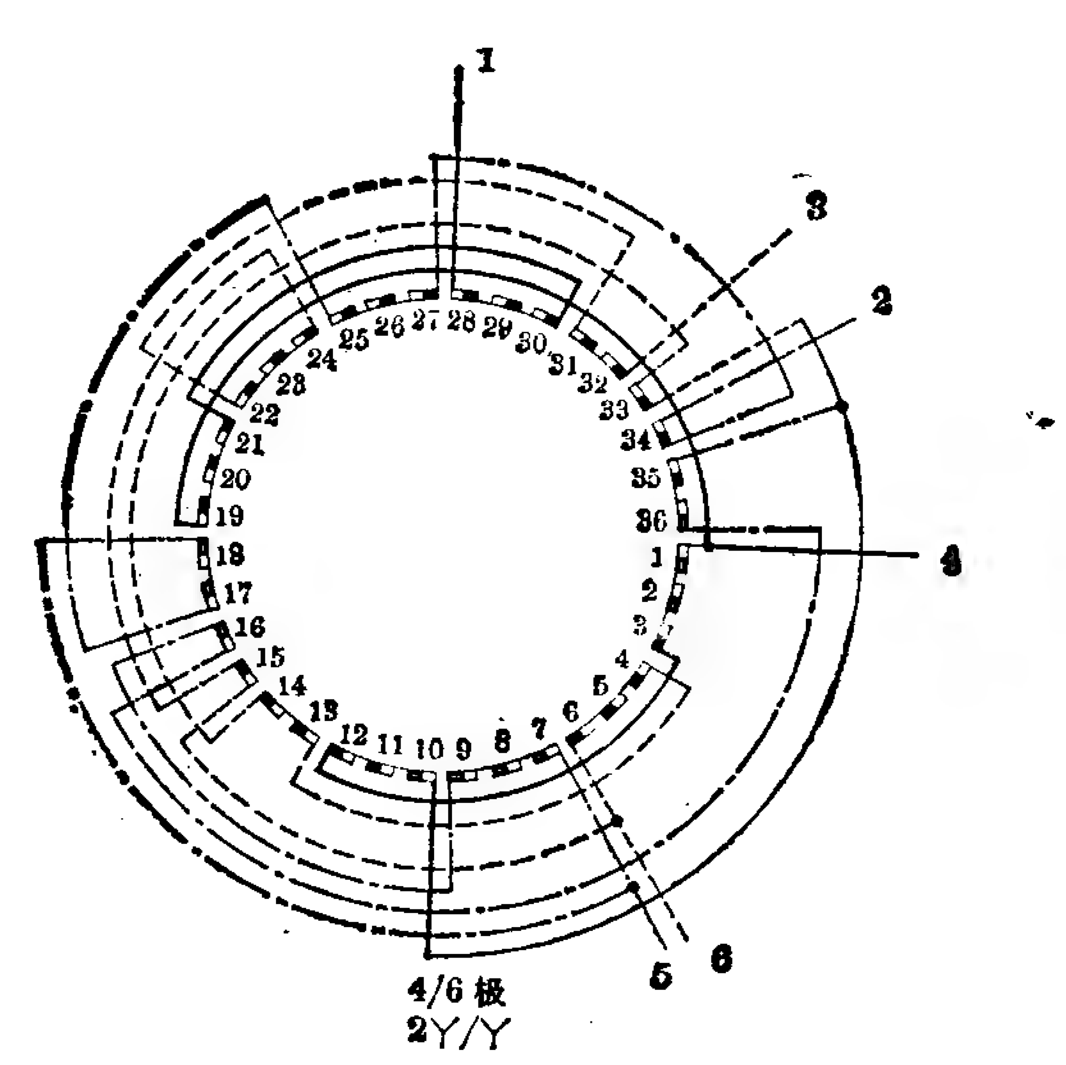


图 4-33　36 槽 4/6 极 2 Y/Y 接线圆图

【例三】 一台 36 槽 6/8 极双速电动机，其绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
8　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$
6　极	$-a$	c	c	$-b$	a	a	$-c$	b	b	$-a$	c	c	$-b$	a	a	$-c$	$-b$	b
反向指示	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		*
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
8　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$
6　极	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	$-b$	$-b$	a	$-c$	$-c$	b	$-a$	$-a$	c	b	$-b$
反向指示																	*	

接线方法采用 2Y/△。观察绕组排列表知 A_I 应为1、5、6、10、14、15六槽，A_{II} 为19、23、24、28、32、33六槽。B_I 为4、8、9、13、18、35六槽，B_{II} 为17、22、26、27、31、36六槽。C_I 为2、3、7、11、12、16六槽，C_{II} 为20、21、25、29、30、34六槽。画成接线图如图4-34所示。

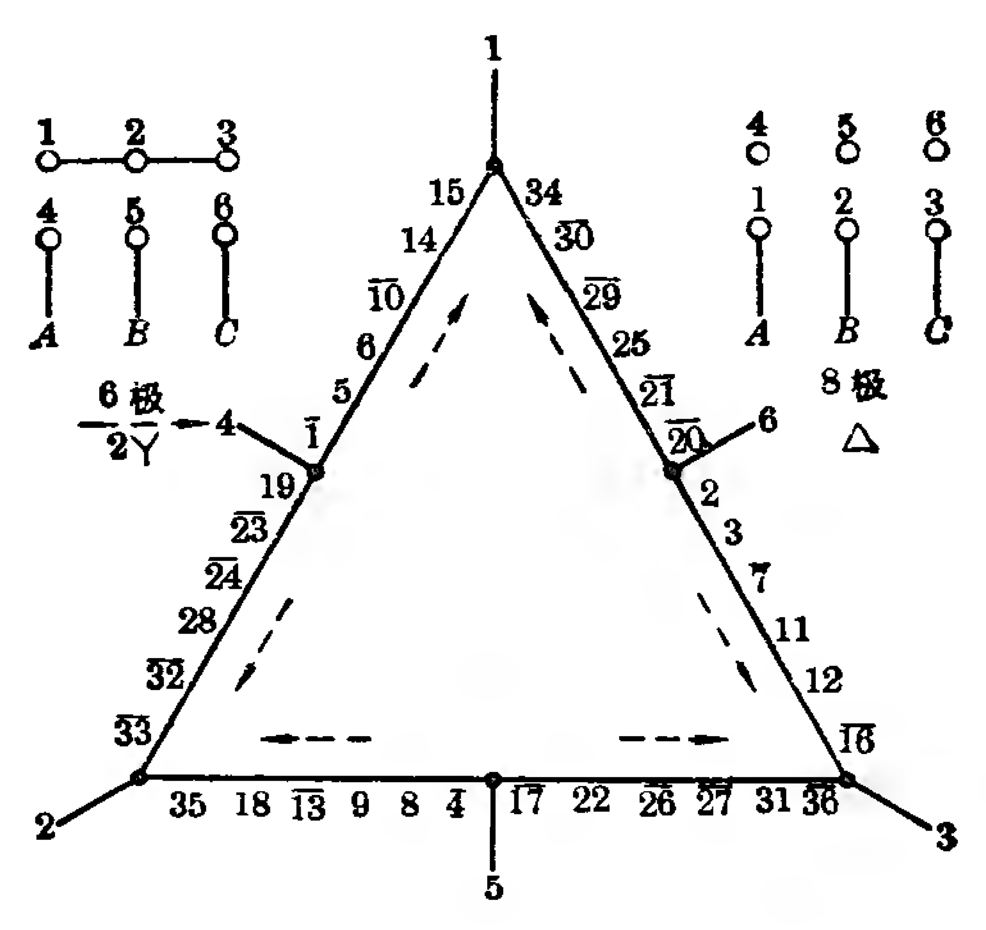


图 4-34　36 槽 6/8 极双速电动机绕组接法

图 4-34 中为简单计没有画出线圈图形，而只标出它所占的槽号及正负。这种图同样可以清楚地表明各槽线圈间的接线关系。本书第九章中普遍采用这种形式的图来表示绕组接线关系，因此我们应习惯于看这种图，根据这种图看出各槽线圈应如何联接。接线圆图见图 4-35。

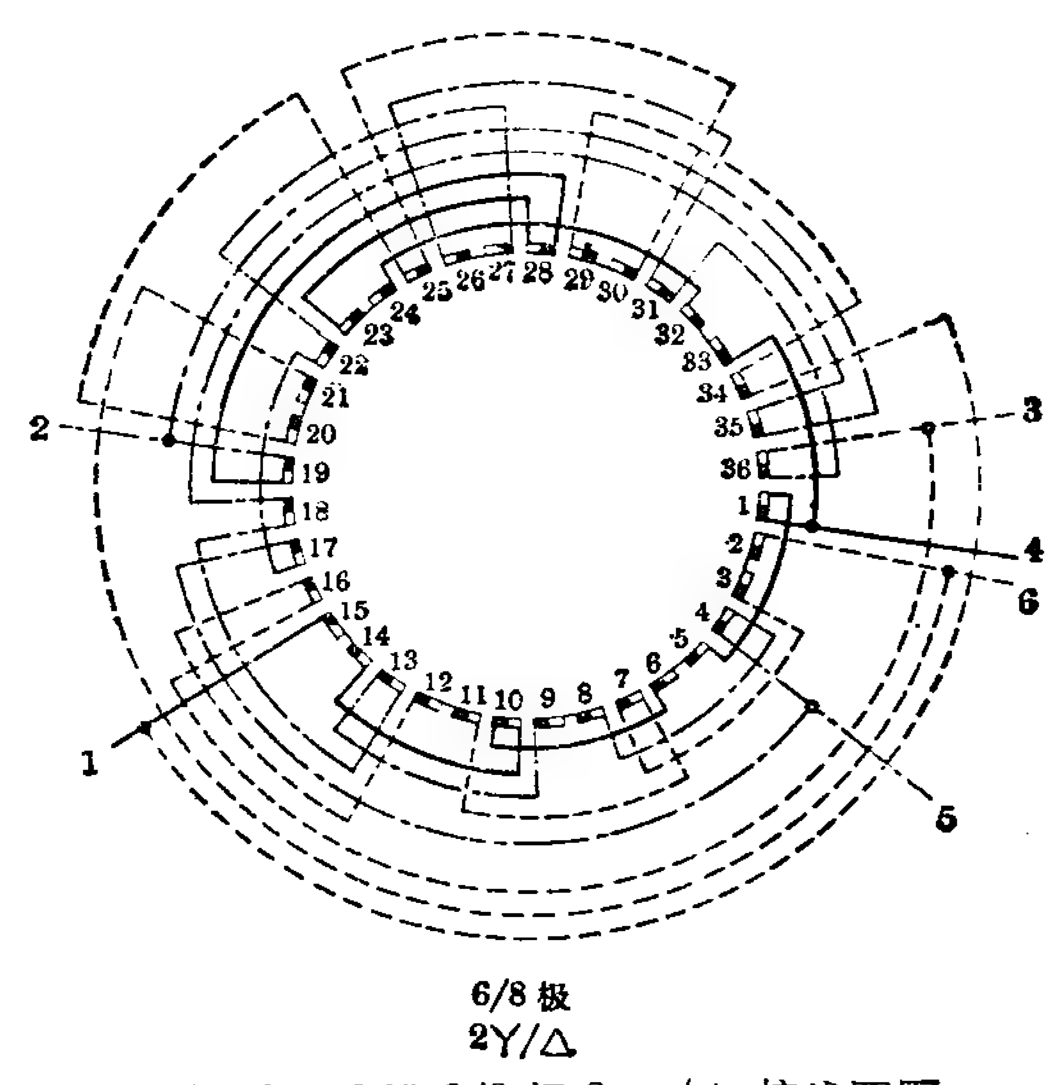


图 4-35 36 槽 6/8 极 2 Y/△ 接线圆图

2. 单绕组三速电动机接线方法

单绕组三速电动机接线方法用得较多的是 2Y/2Y/2Y 和 2△/2△/2Y，出线头 9 根。也有用到 2△/2Y/2Y 接法的，出线头 12 根。还有其他的接线方法，但出线头较多，本书不多介绍。

(1) 2Y/2Y/2Y 接线方法

这种接线方法见图 4-36；在图 4-37 中分别画出了三种情况下的接线示意图，图中 1、2、3、4，5、6、7、8，9、10、11、

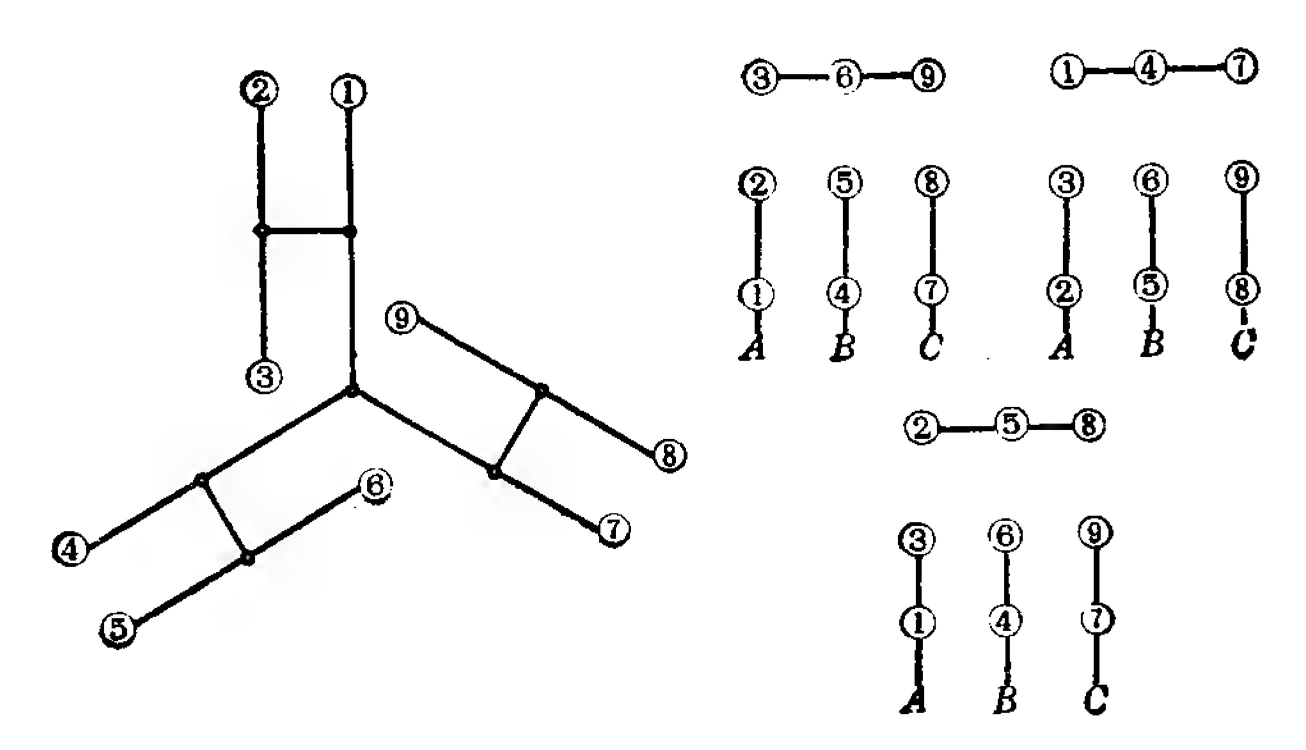


图 4-36　2Y/2Y/2Y 接法

图 4-37　图 4-36 的三种接线示意

12，分别表示 A、B、C 三相的线圈组号，“*”为反向记号。由

图 4-37 可清楚看出，由 2Y 接法 (a) 变成 2Y 接法 (b) 时，线圈组 2、3、5、8、9、12 电流均反向，满足各相线圈电流一半反向的要求；由 2Y 接法 (b) 变成 2Y 接法 (c) 时，线圈组 1、2、5、6、9、10 电流均反向，也满足各相线圈电流一半反向的要求。

下面再以上节中的 36 槽 4/6/8 极三速电动机绕组方案来说明 2Y/2Y/2Y 的接线方法。

先看 A 相情况，观察绕组排列表同时对照图 4-37 可看出，1、2、3 三槽线圈在极数由 4 变至 6、8 时均不反向，因此应作为线圈组 4。10、11、12 三槽线圈由 4 极变至 6 极时不反向，由 6 极变至 8 极时反向，因此应作为线圈组 1。19、20、21 三槽线圈由 4 极变至 6 极以及 6 极变至 8 极时均反向，因此应作为线圈组 2。28、29、30 三槽线圈由 4 极变至 6 极时反向，由 6 极变至 8 极时不反向，因此应作为线圈组 3。B、C 两相各线圈组应占槽号的确定方法和 A 相相同。

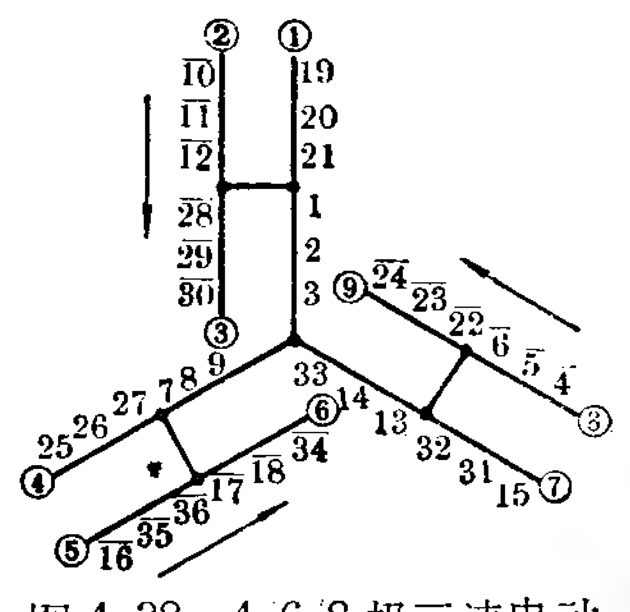


图 4-38　4/6/8 极三速电动机的 2Y/2Y/2Y 接法

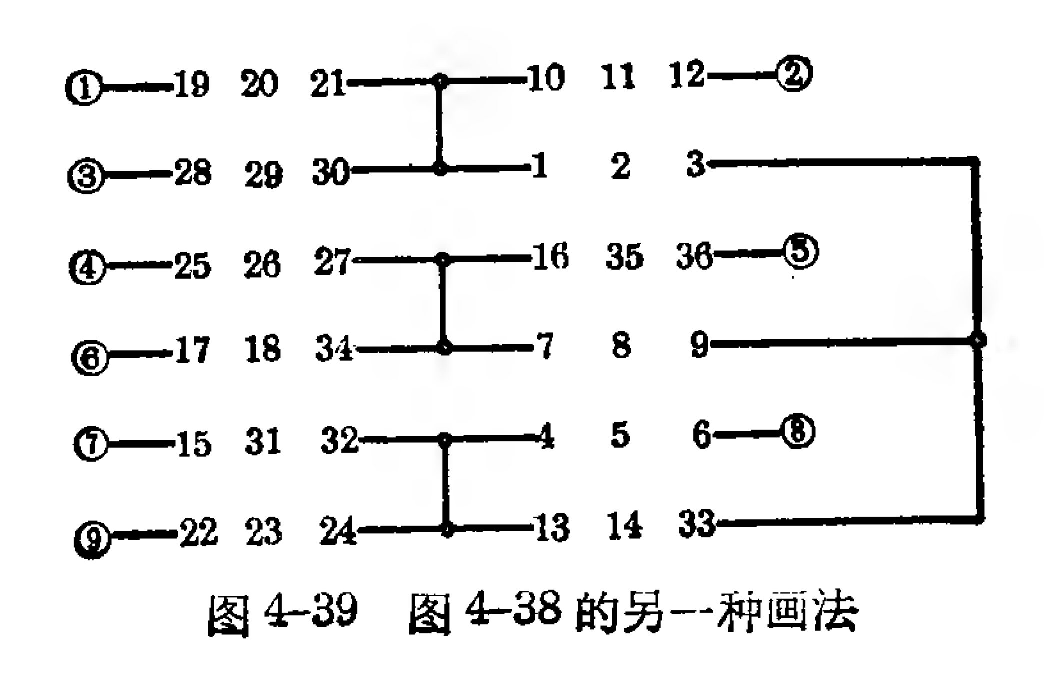


图 4-39　图 4-38 的另一种画法

全部线圈组应占槽号确定之后，就可以画出接线图如图4-38所示，图中各槽线圈正负号均以4极为准。图4-39是图4-38的另一种形式的画法。

(2) 2△/2△/2Y 接线方法

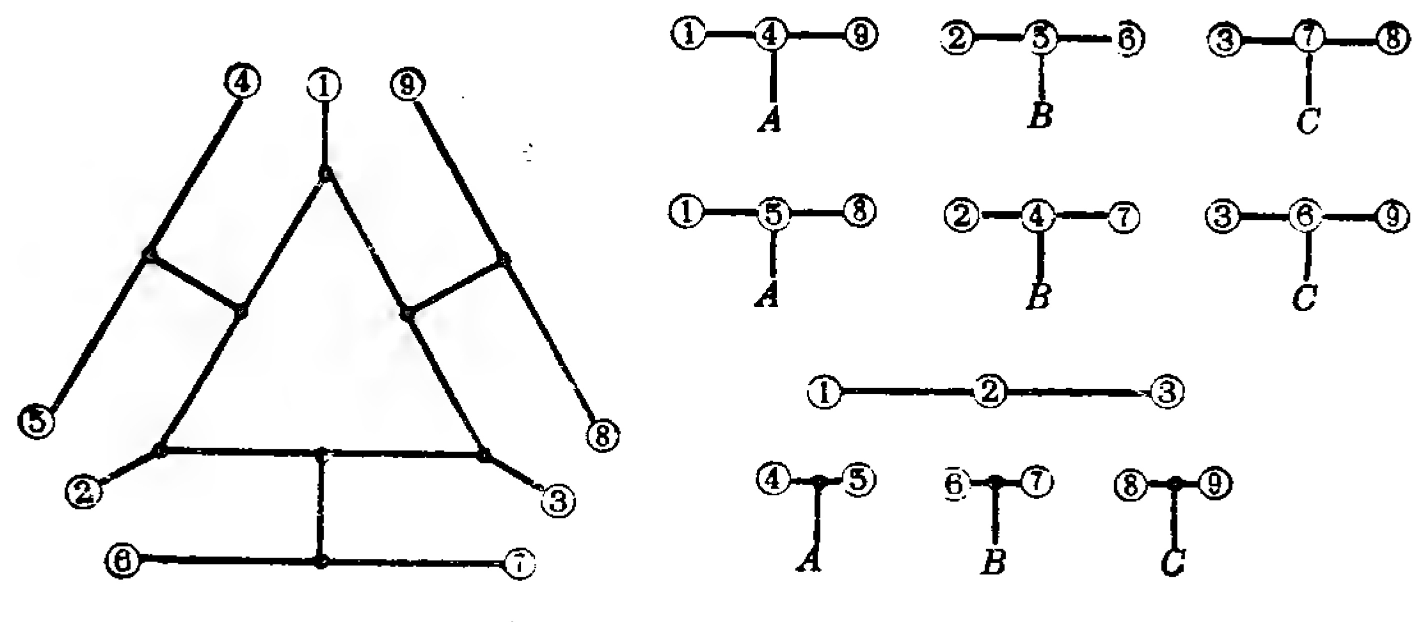


图 4-40 2△/2△/2Y 接法

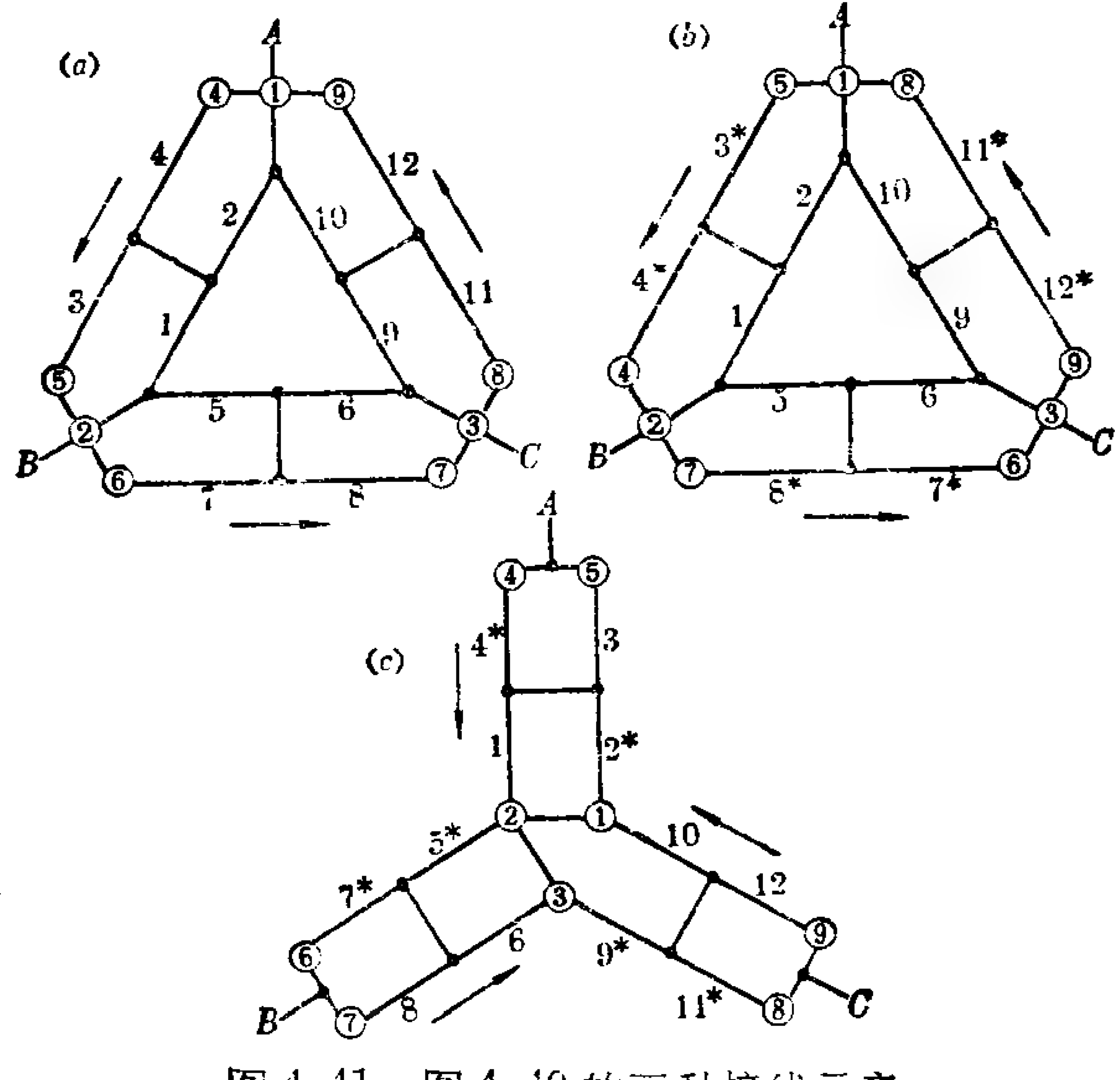


图 4-41 图 4-40 的三种接线示意

接线方法见图 4-40。图 4-41 分别画出了三种情况下的接线示意图，由图可看出，由 2△ 接法(*a*)变成 2△ 接法(*b*)时，线圈组 3、4、7、8、11、12 反了向；由 2△ 接法(*b*)变成 2Y 接法(*c*)时线圈组 2、4、5、7、9、11 反了向。

下面再以一只 36 槽 2/4/8 极三速电动机绕组为例来说明 2△/2△/2Y 的具体接线方法。该电动机绕组排列表见本书 99 页，观察绕组排列表同时对照图 4-41 可得到如下表所示的关系：

反向情况 ＼ (线圈组号) 应占槽号	相号		
	A	B	C
2 极→4 极　4 极→8 极　都不反向	(1) 1, 2, 3	(6) 13, 14, 15	(10) 25, 26, 27
2 极→4 极　4 极→8 极　都反向	(4) 22, 23, 24	(7) 34, 35, 36	(11) 10, 11, 12
2 极→4 极 不反向 4 极→8 极 反向	(2) 4, 5, 6	(5) 16, 17, 18	(9) 28, 29, 30
2 极→4 极 反向 4 极→8 极 不反向	(3) 19, 20, 21	(8) 31, 32, 33	(12) 7, 8, 9

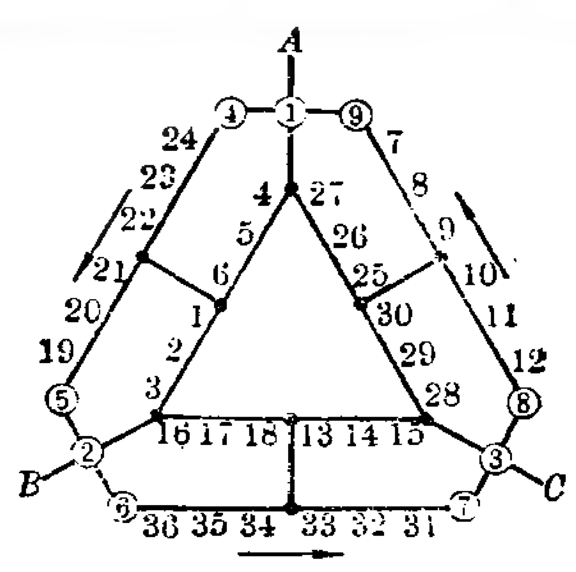


图 4-42　36 槽 2/4/8 极三速电动机两极时的绕组联接

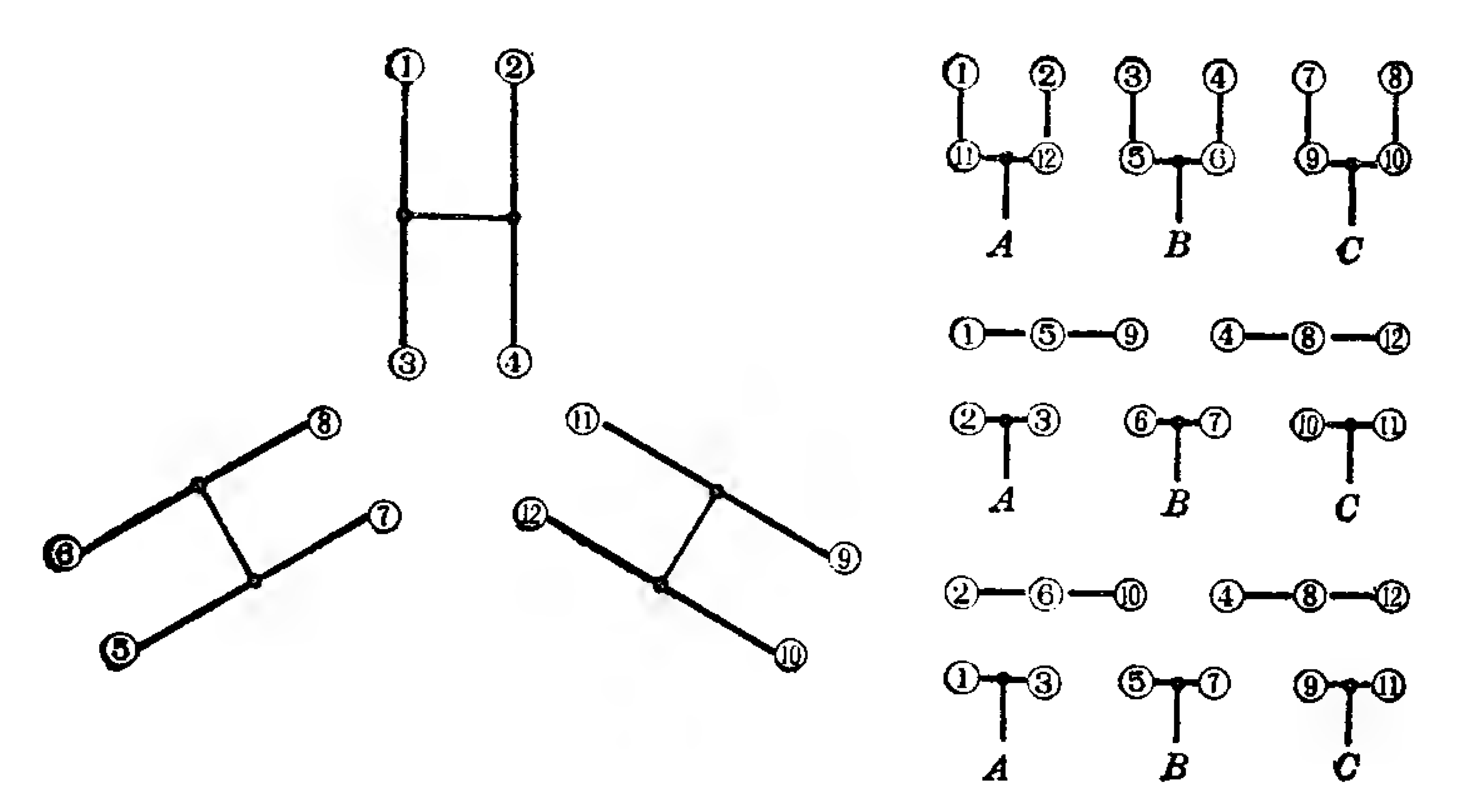


图 4-43　图 4-42 三速电动机的绕组出线头及 2△/2Y/2Y 接法

(a)　(b)　(c)

图 4-44　图 4-43 的三种接法示意

根据这个关系，以2极为基准即可画出图4-42所示的接线图。

(3) 2△/2Y/2Y 接线方法

采取这种接法的出线头为12根，接线方法见图4-43。图4-44分别画出了三种情况下的接线示意图，由图可看出，由2△接法(*a*)变成2Y接法(*b*)时，线圈组2、4、5、7、9、11反了向；由2Y接法(*b*)变成2Y接法(*c*)时，线圈组1、2、5、6、9、10反了向；都满足一半反向的要求。

第四节　换相变极法

第二节讨论的各种绕组方案，都是在各槽相号不变的条件下，通过接线的变化改变部分线圈电流方向达到变极目的。这种用反向法获得的多速电动机绕组，优点是出线头较少(双速电动机仅需6根)，改绕、使用比较方便。但是，绕组分布系数总是受到一定限制，两种极数的分布系数不能同时做到较高，因而电动机性能受到一定影响。换相法就是针对这种情况提出的另一种变极方法。

换相法和反向法不同点在于：变极时不仅改变部分线圈电流方向，而且改变部分槽内线圈的相号。用换相法获得的单绕组多速电动机方案，不同极数的分布系数都可保持较高，从而弥补了反向法的不足。但其缺点是出线头较多，使用和控制不如反向法方便。

1. 一般接法的换相法

(1) 换相变极法的绕组排列

一般接法指的是普通的△和Y接法。现举一个36槽2/4极双速绕组为例，并以反向法和换相法两种方案作比较来说明换相法的优缺点。

下表是用反向法得出的36槽2/4极双速绕组排列表，2极为正规60°相带绕组，用庶极接法获得4极，分布系数分别是 $K_{d2}=0.96$，$K_{d4}=0.831$。

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2　极	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
4　极	a	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b	b
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
2　极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
4　极	a	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b	b

现在来看换相法。用换相法变极的基本出发点是使两种极数都保持正规60°相带绕组，从而使两种极数都能得到较高的分布系数：$K_{d2}=0.956$，$K_{d4}=0.96$（同时谐波磁场也能减少，详见第八章）。

为在两种极数情况下都保持正规60°相带绕组，绕组就应按下表排列（正规60°相带绕组排列方法参见第三章）：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2　极	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
2　极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
4　极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$

(2) 接线方法

换相变极法最主要的一个问题是如何在接线上实现这种绕组方案。我们仔细观察绕组排列表，表中36槽线圈可分成

12 组，每组 3 只，例如 1、2、3 一组，4、5、6 一组……，由 2 极变 4 极时，各相线圈变化如下：

A 相：

1）一半线圈组即 1、2、3 和 19、20、21 相号不变，但其中有一半即 19、20、21 一组线圈反向；

2）一半线圈组即 4、5、6 和 22、23、24 变为 *C* 相，同时其中再有一半即 4、5、6 一组线圈还反向；

B 相：

1）一半线圈组即 16、17、18 和 34、35、36 相号不变，但其中有一半即 16、17、18 一组线圈反向；

2）一半线圈组即 13、14、15 和 31、32、33 变为 *C* 相，同时其中再有一半即 31、32、33 一组线圈还反向；

C 相：

1）一半线圈组即 10、11、12 和 28、29、30 变为 *A* 相，其中再有一半即 28、29、30 一组线圈还反向。

2）一半线圈组即 7、8、9 和 25、26、27 变为 *B* 相，其中再有一半即 7、8、9 一组线圈还反向。

综合全部线圈变极时的变化情况可看到，这里既有换相，也有反向。

为了清楚地、从简到繁地得出换相变极法的接线方法，我们第一步先来看如何在接线上实现上述换相的要求。为此我们可把各相均分成两个线圈组，并以 △ 接法为例来说明。假设 2 极时接线如图 4-45(*a*) 所示，出线头 1、2、3 进电，4、5、6 开路，线圈组 *I*、*II* 为 *A* 相，*III*、*IV* 为 *B* 相，*V*、*VI* 为 *C* 相。现在如果从出线头 4、5、6 进电，1、2、3 开路，并取相序与前相反，如图 4-45(*b*) 所示。可以看出，图 4-45(*a*) 中原为 *A* 相的线圈组 *I* 仍为 *A* 相，线圈组 *II* 则变为 *C* 相；原

为 B 相的线圈组 IV 仍为 B 相，线圈组 III 则变为 C 相；原为 C 相的线圈组 VI 变为 A 相，线圈组 V 则变为 B 相。显然，这样就满足了上述换相的要求。

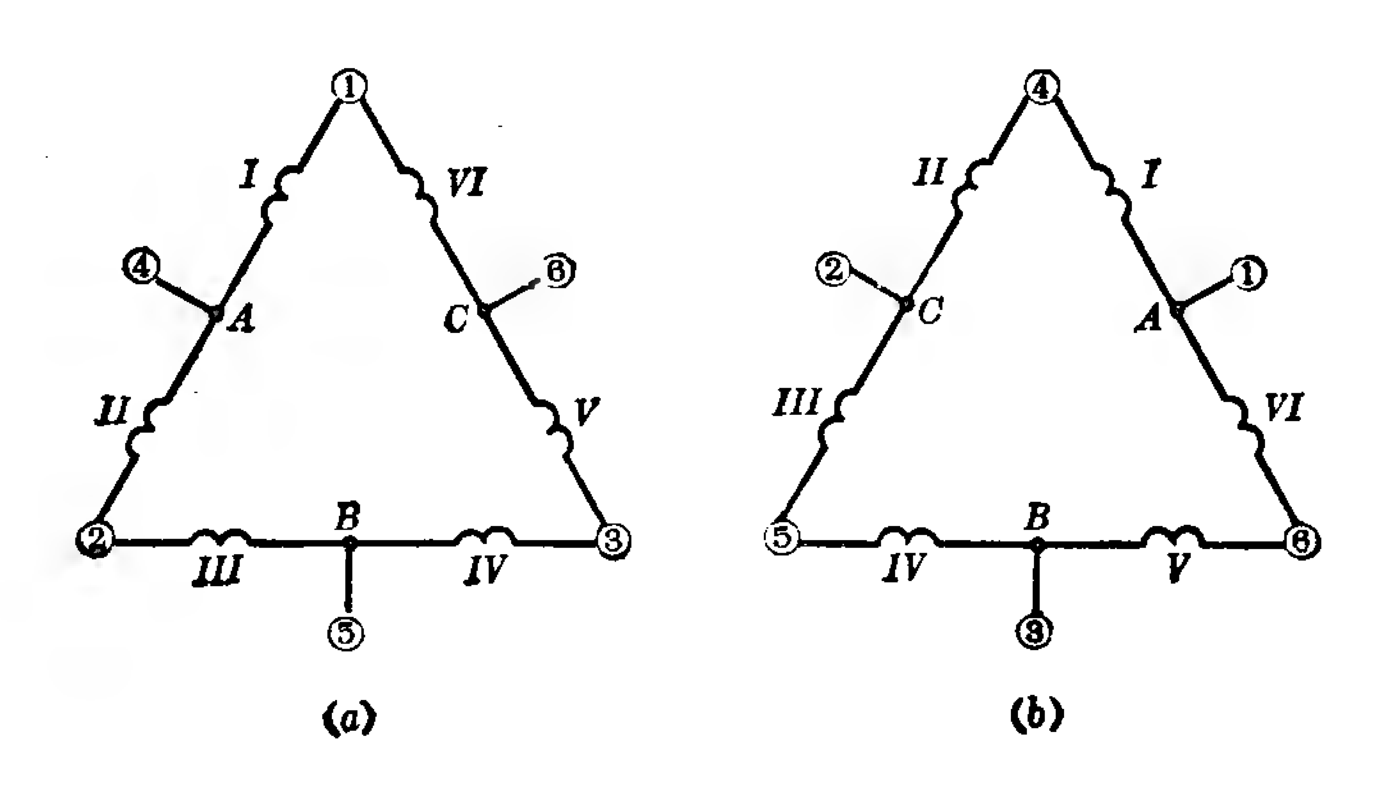


图 4-45　换相的接线示意

第二步再来看如何在换相基础上同时做到上述反向要求。这个反向要求对图 4-45 来说就是要求每个线圈组在变极

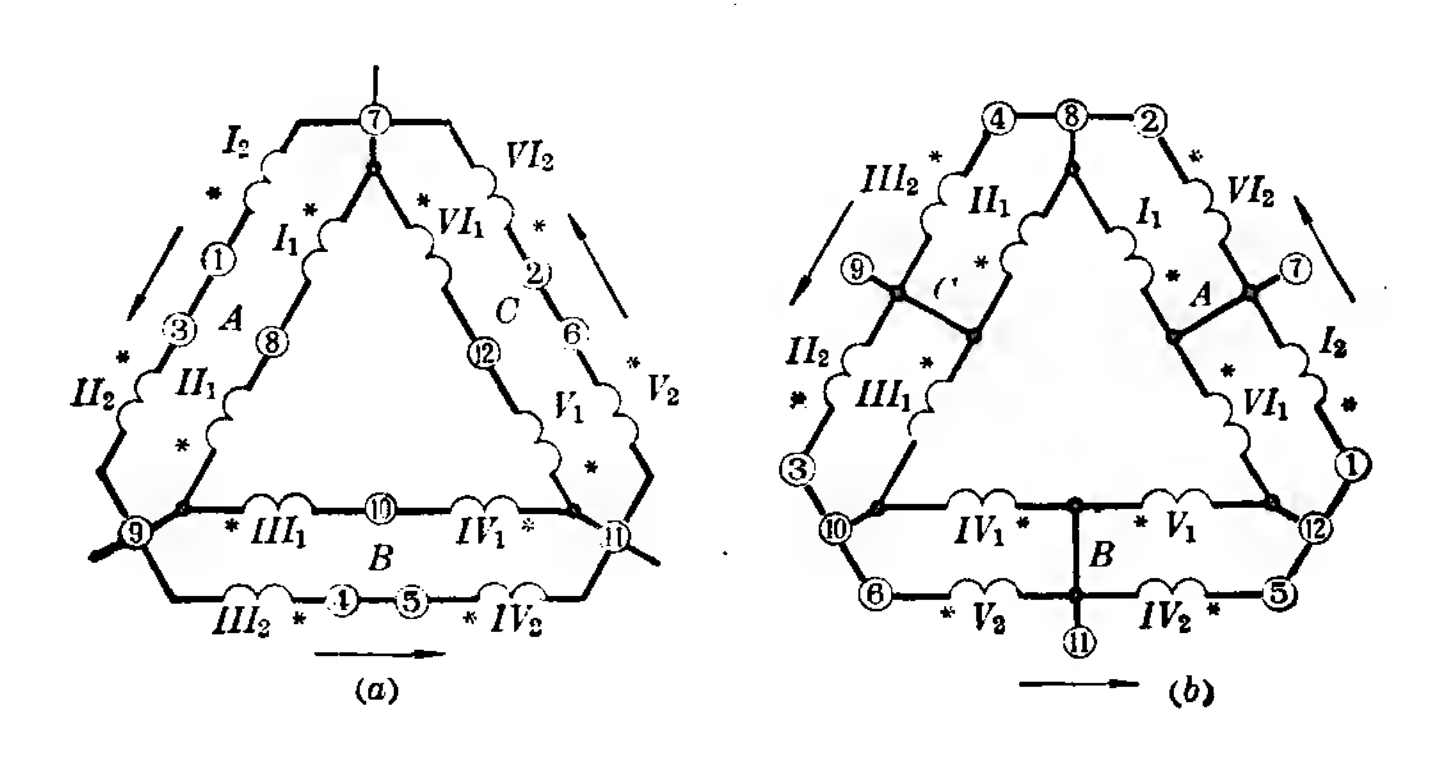


图 4-46　换相(并反向)变极法的接线示意

时各有一半线圈反向。为此每个线圈组必须拆成两个（也就是说变成 12 个线圈组，每组 3 只线圈），并且两者必须并联，一路 △ 变成了两路 △，见图 4-46(*a*)、(*b*)。图中"*"为极性记号，电流自"*"端流入为正，自"*"端流出为负。比较图 4-46(*a*)和(*b*)可知，线圈组 I_2、II_2、III_2、IV_2、V_2、VI_2 变极时都反了向，即满足了换相和反向的全部要求。图 4-46 出线头共 12 根。

现在来画出本例 36 槽 2/4 极换相法绕组方案的接线图。根据绕组排列表对照图 4-46 可知，12 个线圈组对应的槽号分别是：I_1—1、2、3，I_2—19、20、21，II_1—22、23、24，II_2—4、5、6，III_1—13、14、15，III_2—31、32、33，IV_1—34、35、36，IV_2—16、17、18，V_1—25、26、27，V_2—7、8、9，VI_1—10、11、12，VI_2—28、29、30。

以 2 极为准可画出接线图如图 4-47 所示。

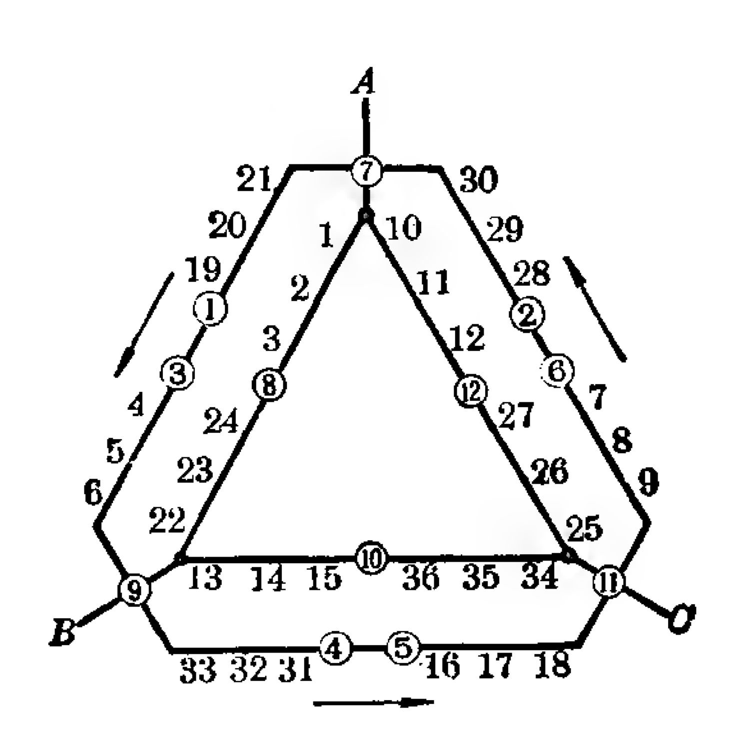


图 4-47　36 槽 2/4 极换相变极法 2 极绕组接线图

在单绕组双速电动机中，一般接法换相法的缺点是：出线头多，使用和控制显得很不便，因而实际采用不多。但是单绕组三速以上的电动机，这个缺点就相对地不那么明显。因为我们知道，如果用反向法获得三速绕组，采用 2Y/2Y/2Y 或 2△/2△/2Y 接法，出线头也要 9 根。而 2 极变 4 极采用换相法变极的 2/4/8 极三速电动机绕组（见下表，8 极由 4 极采用庶极接法获得）出线头也不过 12 根，其绕组排列表如下：

2极变4极采用换相法变极的2/4/8极三速电动机绕组排列表

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2 极	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
4 极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
8 极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b
槽号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
2 极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
4 极	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$
8 极	a	a	a	c	c	c	b	b	b	a	a	a	c	c	c	b	b	b

绕组接线图见图4-48，4、8极的接线图分别如图4-49(*a*)、(*b*)(2极接线图与图4-47同)；分布系数分别为$K_{d2}=0.956$，$K_{d4}=0.96$，$K_{d8}=0.844$。

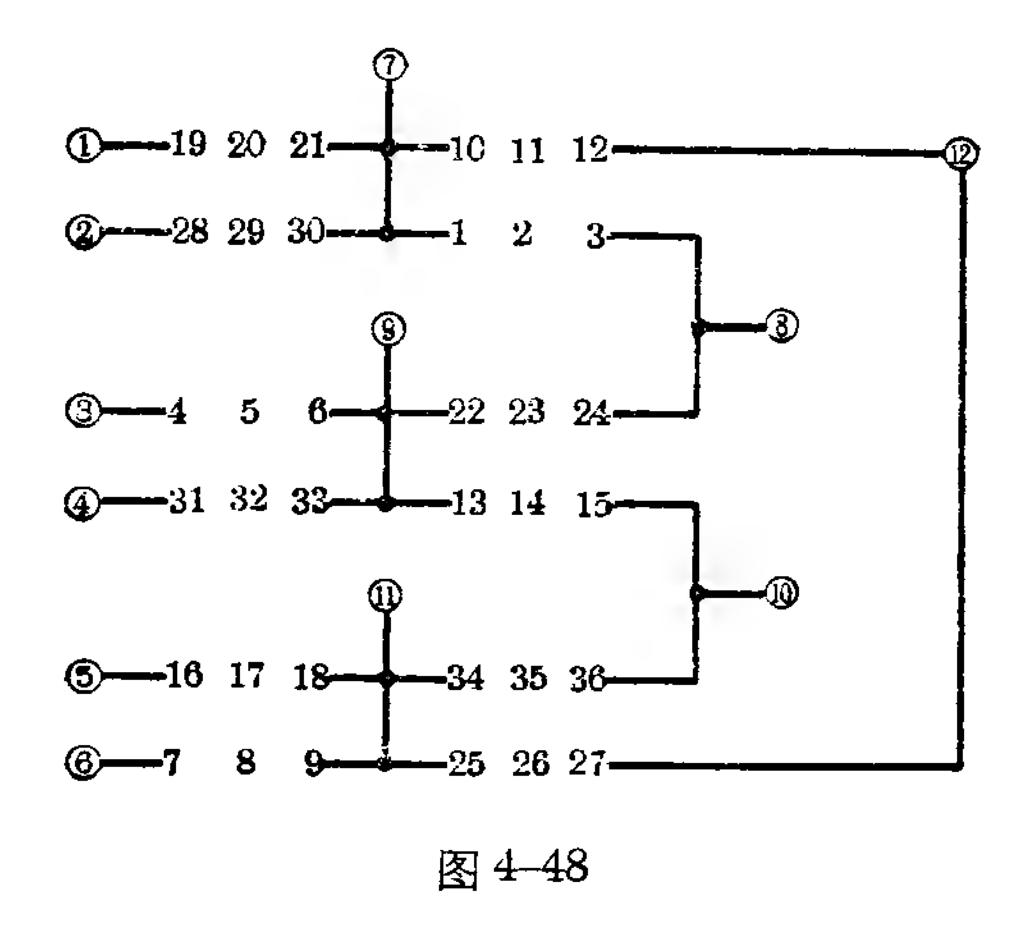


图4-48

2. 具有△接法的换相法

前面讨论的换相法，接法是一般的△或Y形。这里介

绍一种 △ 和 Y 形结合起来的特殊接法，即具有 △Y 接法的换相法。用这种方法也可以获得较高的分布系数，而且出线头较少。

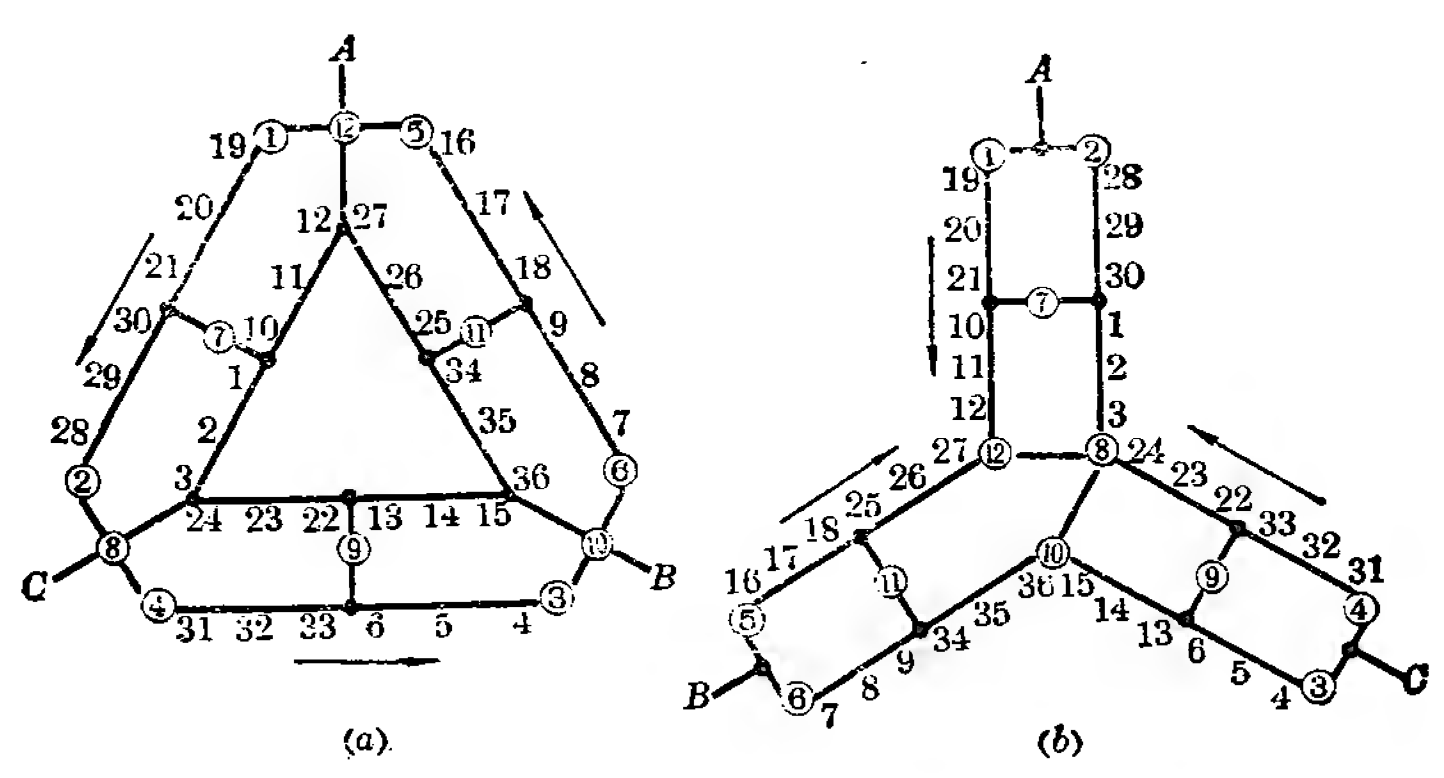


图 4-49　2 极变 4 极采用换相法的 2/4/8 极三速电动机的 4 极和 8 极时的接线图

△Y 接法的特点是一相所含的全部线圈中部分作 △ 联接，部分作 Y 联接。图 4-50 是 △Y 接法的示意图。由于接法不同就带来了与一般接法不同的特点，即一相全部线圈电流在时间上相位将不一致，Y 部分线圈电流在时间上比 △ 部分线圈电流滞后 30° 相位角。

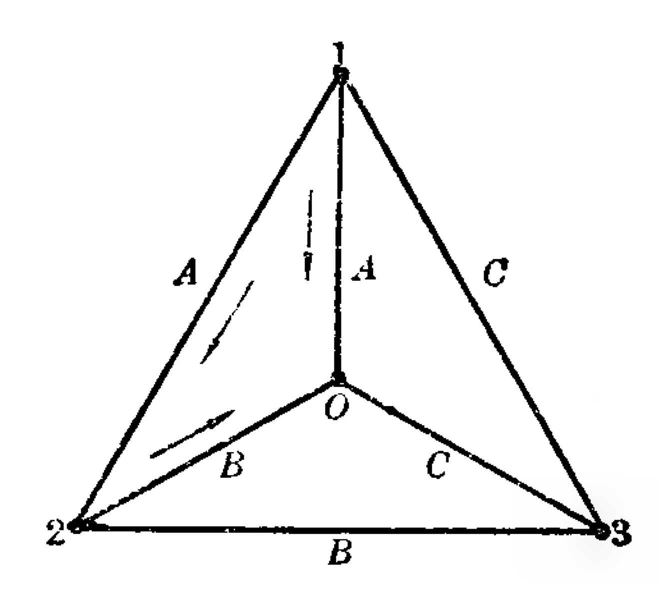


图 4-50　△Y 接法示意图

图 4-50 中，A、B 两相 Y 部分线圈电流分别为 I_{10} 和 I_{20}，A 相 △ 部分线圈电流为 I_{12}。由于三相制的特点 I_{10} 和 I_{20} 在时间上应差 120° 相角。A 相 △ 部分线圈电流 I_{12} 应

为 I_{10} 和 I_{02}（注意：I_{02} 和 I_{20} 方向相反，数值相等）的矢量和。由图 4-51 可看出，$\triangle$ 联接的结果，A 相 Y 部分线圈电流 I_{10} 在时间上将较 △ 部分线圈电流 I_{12} 滞后 30° 相位角。用同法分析，可知 B、C 两相情况也如此。

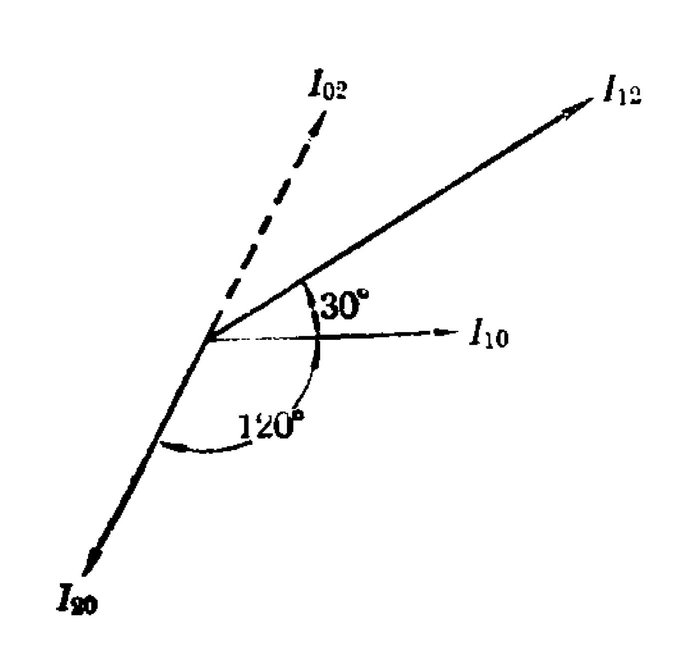


图 4-51　$\triangle$ 接法时一相两部分线圈中电流的相位差

$\triangle$ 接法绕组，除了在时间上同一相不同部分线圈电流有 30° 相角差之外。在空间上 Y 部分线圈合成电势也滞后于△部分线圈合成电势 30° 相位角（由绕组排列决定）。

$\triangle$ 接法绕组分布系数可分别按 △ 和 Y 两部分线圈单独算出。

下面以第九章中有关 $\triangle$ 接法的绕组方案为例，具体说明其特点及分布系数的计算。

【方案 3】　36 槽，2/4 极

该方案 2、4 极时都采用 $\triangle$ 接法，利用换相法变极；绕组排列表如下：

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
2　极	a	a	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
4　极	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	a	a	a	a	b	b	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
2　极	b	b	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
4　极	c	c	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	c	c	c	c

2 极槽矢量图及 A 相矢量分布如图 4-52，绕组接线如图 4-53。A 相矢量分布中矢量 1、2、3、4、$\overline{21}$、$\overline{22}$、$\overline{23}$、$\overline{24}$ 属 △ 部分，其合成电势矢量为 $A_{\triangle}$。矢量 5、6、7、8 属 Y 部分，其

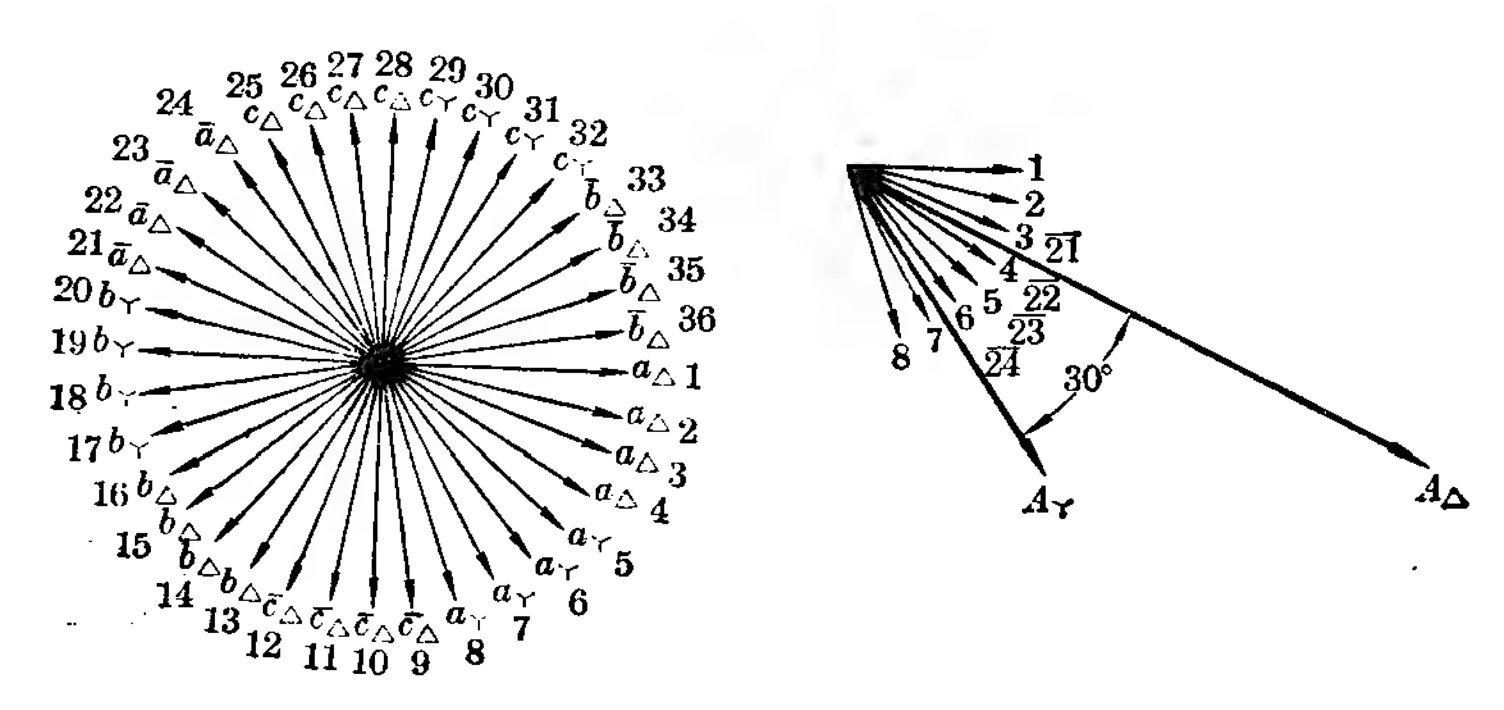


图 4-52　36 槽 2/4 极采用 △ 接法换相变极 2 极时的槽矢量和 A 相矢量分布

合成电势矢量为 A_{Y}，正好较 $A_{\triangle}$ 滞后(空间)30° 相角。B、C 两相矢量情况和 A 相相同，只是各对应矢量顺次相差 120° 电度角。

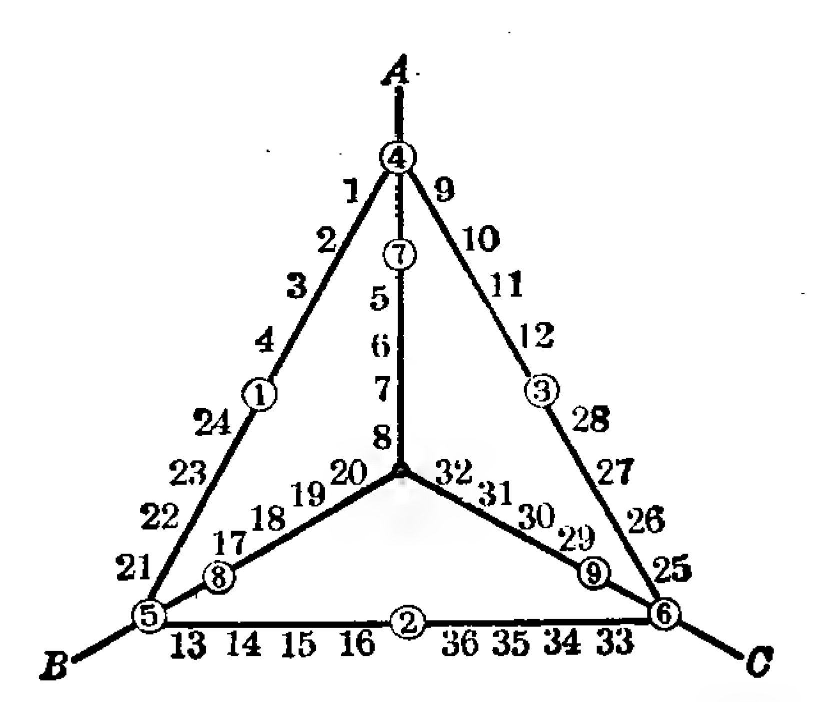


图 4-53　采用 △ 接法换相变极的 36 槽 2 极绕组接线图

2 极时 △ 部分和 Y 部分各自的分布系数 $K_{d\triangle}$ 和 K_{dY}

也可从槽矢量图中分别求出，△部分线圈矢量分布为1、1、2、2、1、1，

$$K_{d\triangle 2}=\frac{2\cos 25^\circ+2\cos 15^\circ+4\cos 5^\circ}{8}$$

$$=\frac{0.906+0.966+2\times 0.996}{4}=0.966$$

Y 部分线圈矢量分布为1、1、1、1，

$$K_{dY2}=\frac{2\cos 15^\circ+2\cos 5^\circ}{4}=\frac{0.966+0.996}{2}=0.981$$

4极槽矢量图及 A 相矢量分布如图4-54；绕组接线如图4-55。A 相矢量分布中矢量21、22、23、24、$\overline{13}$、$\overline{14}$、$\overline{15}$、$\overline{16}$ 属△部分(矢量分布1、2、2、2、1)，5、6、7、8属Y部分(矢量分布1、1、1、1)。合成电势矢量 A_Y 也正好较 $A_\triangle$ 滞后30°相角。

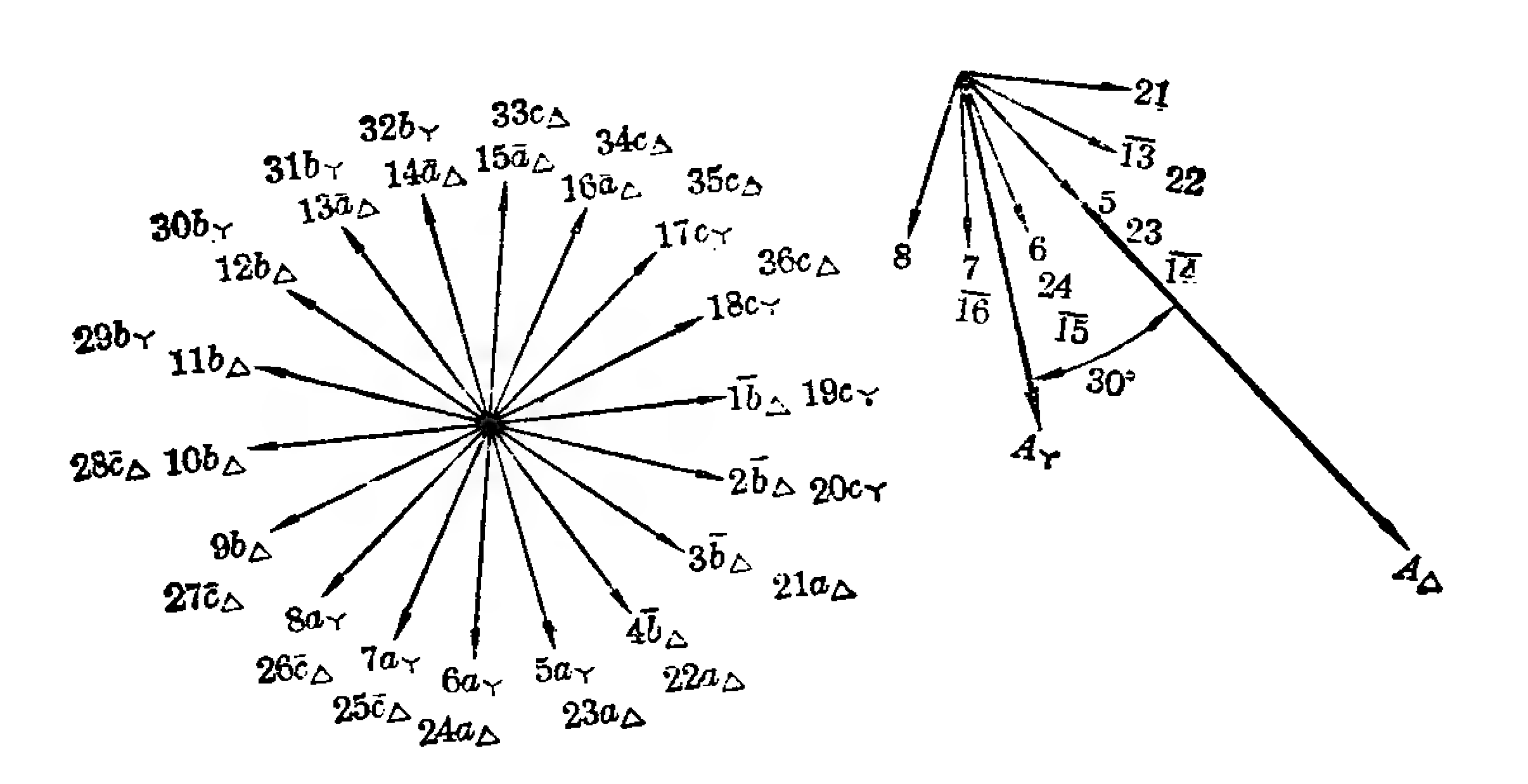


图4-54　方案3四极时的槽矢量和 A 相矢量分布

4极时分布系数可分别求得：

$$K_{d\triangle 4}=\frac{2\cos 40°+4\cos 20°+2}{8}$$

$$=\frac{0.766+2\times 0.94+1}{4}=0.911$$

$$K_{dY4}=\frac{2\cos 30°+2\cos 10°}{4}$$

$$=\frac{0.866+0.985}{2}=0.925$$

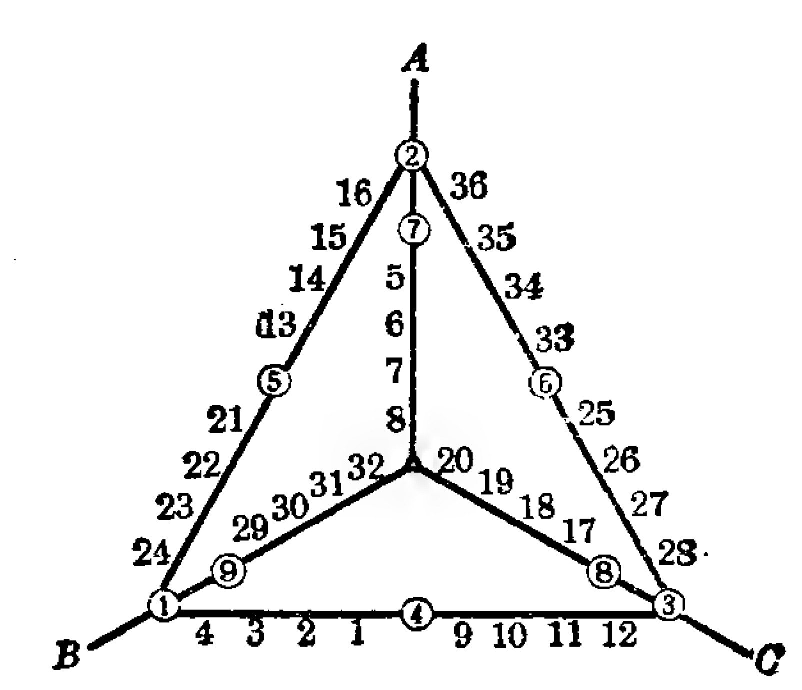


图 4-55　36 槽 2/4 极△接法换相变极双连电动机 4 极接线图

由此可看到此方案在不同极数时的分布系数都较高，同时由于采用了 △ 接法的换相法，出线头也减少为 9 根。

【方案 22】　36 槽，2/4/6 极

该方案 2、4 极采用 △ 接法，6 极为一般 Y 接法(三路)。变极均采用换相法。绕组接线图等参见第九章。2、4 极分布系数和方案 3 相同，6 极分布系数 $K_{d6}=0.836$。

该方案出线头 13 根，不同极数的分布系数也都较高。

【方案 28】　36 槽 4/6/8/12 极

该方案的接线图、槽矢量图等参见第九章，4、8 极是 △ 接法，6 极为两路 △ 接法，12 极为三路 Y 接法；4 极变 6

极、6极变8极均采用换相法，12极系在6极基础上采用庶极接法获得。

4极时A相矢量分布如图4-56，其中槽矢量1、2、19、20、$\overline{11}$、$\overline{12}$、$\overline{29}$、$\overline{30}$属△部分(矢量分布2、4、2)，3、4、21、22属Y部分(矢量分布2、2)；合成电势矢量A_Y较$A_\triangle$滞后30°相角；4极时的分布系数分别是：

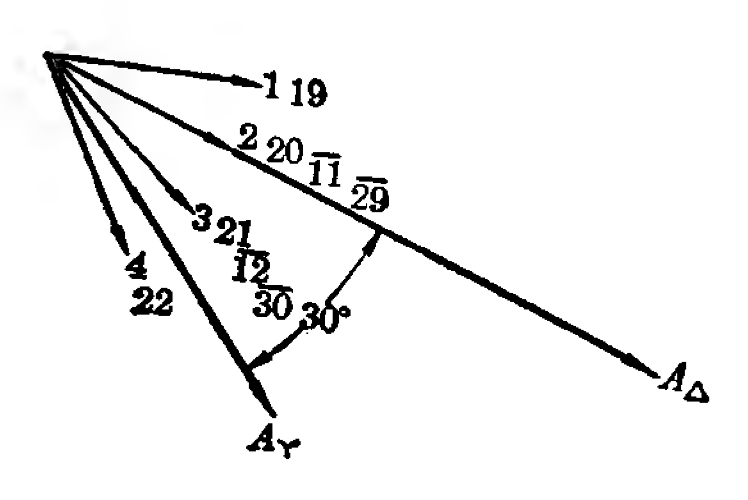


图4-56 方案28四极时的A相矢量分布

$$K_{d\triangle 4}=\frac{4\cos 20°+4}{8}=\frac{0.94+1}{2}=0.97$$

$$K_{dY4}=\frac{4\cos 10°}{4}=0.985$$

8极时A相矢量分布如图4-57，其中槽矢量17、18、35、36、$\overline{13}$、$\overline{14}$、$\overline{31}$、$\overline{32}$属△部分(矢量分布2、2、2、2)，9、10、27、28属Y部分(矢量分布2、2)；合成电势矢量A_Y较$A_\triangle$滞后30°相角；8极时的分布系数分别是：

$$K_{d\triangle 8}=\frac{4\cos 30°+4\cos 10°}{8}=\frac{0.866+0.985}{2}=0.925$$

$$K_{dY8}=\frac{4\cos 20°}{4}=0.94$$

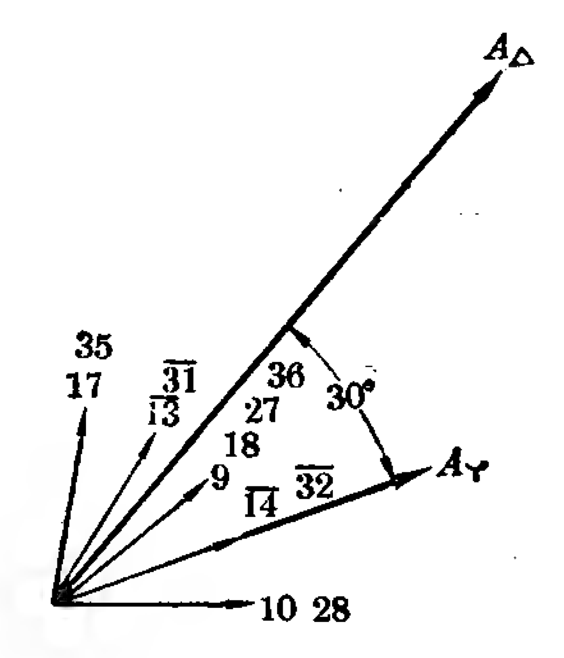


图4-57 方案28八极时的A相矢量分布

6极、12极的分布系数分别是$K_{d6}=0.966$，$K_{d12}=0.866$。由此看到由于采用了△接法的换相法，该四速单绕组

方案在四种极数时的分布系数均较高，出线头为 25 根。

【方案 29】 54槽，4/6/8/12 极

该方案的接线图、槽矢量图等参见第九章；不同极数的接法和变极方法与方案 28 相同。

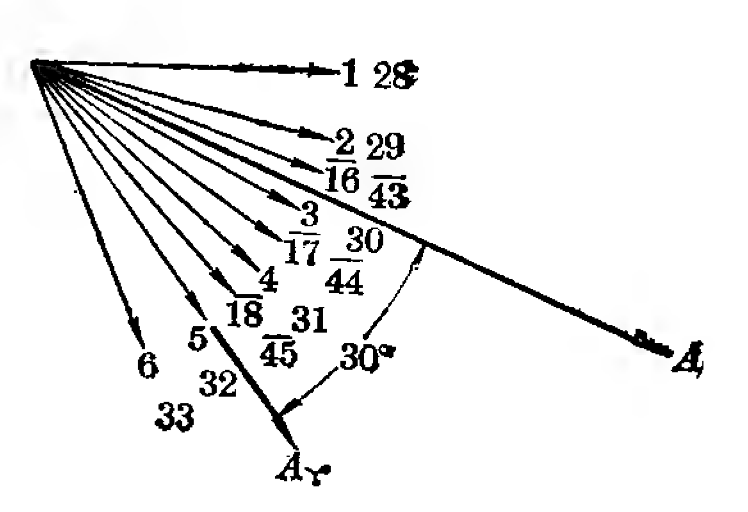


图 4-58 方案 29 四极时的 A 相矢量分布

4 极时 A 相矢量分布如图 4-58，其中槽矢量 1、2、3、28、29、30、$\overline{16}$、$\overline{17}$、$\overline{18}$、$\overline{43}$、$\overline{44}$、$\overline{45}$ 属 △ 部分（矢量分布 2、2、2、2、2、2），4、5、6、31、32、33 属 Y 部分（矢量分布 2、2、2）；合成电势矢量 A_Y 较 $A_\triangle$ 滞后 30° 相角。4 极时的分布系数分别是：

$$K_{d\triangle 4}=\frac{4\left(\cos\frac{10^\circ}{3}+\cos\frac{30^\circ}{3}+\cos\frac{70^\circ}{3}\right)}{12}$$

$$=\frac{0.998+0.985+0.918}{3}=0.967$$

$$K_{dY4}=\frac{4\cos\frac{40^\circ}{3}+2}{6}=\frac{2\times0.973+1}{3}=0.982$$

8 极时 A 相矢量分布如图 4-59，其中槽矢量 25、26、27、52、53、54、$\overline{19}$、$\overline{20}$、$\overline{21}$、$\overline{46}$、$\overline{47}$、$\overline{48}$ 属 △ 部分(矢量分布 2、2、2、2、2、2)，13、14、15、40、41、42 属 Y 部分（矢量分布 2、2、2)；合成电势矢量 A_Y 较 $A_\triangle$ 滞后 30° 相角。8 极的分布系数分别是：

$$K_{d\triangle 8}=\frac{4\left(\cos\frac{30^\circ}{3}+\cos\frac{50^\circ}{3}+\cos\frac{110^\circ}{3}\right)}{12}$$

$$=\frac{0.985+0.958+0.802}{3}=0.915$$

$$K_{dY8}=\frac{4\cos\frac{80^\circ}{3}+2}{6}=\frac{2\times0.894+1}{3}=0.93$$

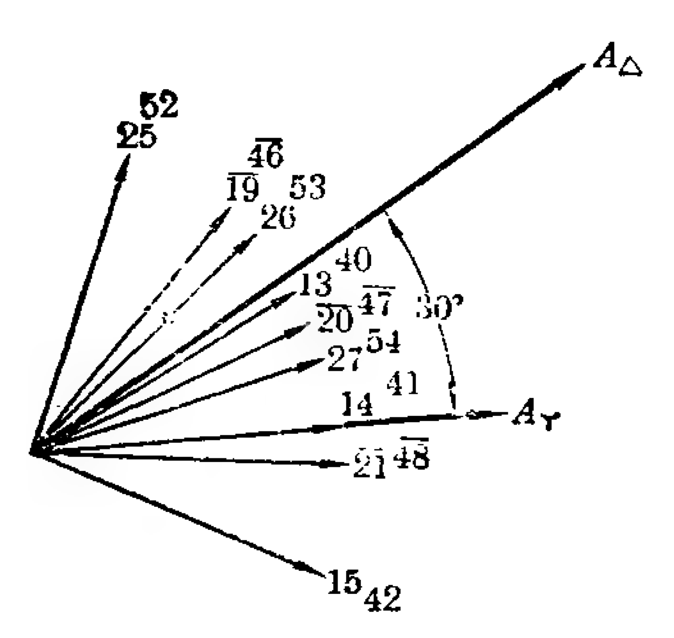


图 4-59　方案 29 八极时的 A 相矢量分布

6 极、12 极的分布系数分别是 $K_{d6}=0.96$, $K_{d12}=0.844$。由于采用 △ 接法的换相法，该方案四种极数的分布系数也都较高，出线头也为 25 根。

由以上四个例子可看出，尽管一相矢量分布较散，但由于采用了 △ 接法，这些方案都获得了较高的分布系数，尤其是两只四速电动机体现明显。但是用一分为二观点来看事物，△ 接法较之一般接法也有其缺点一面，那就是绕制比较复杂。因为 Y 部分线圈较之 △ 部分线圈电流大 $\sqrt{3}$ 倍，电压小 $\sqrt{3}$ 倍，因此两部分线圈线规和匝数应不等，Y 部分线圈导线总截面应比 △ 部分导线总截面大 $\sqrt{3}$ 倍；而匝数应为 △ 部分匝数的 $\frac{K_{dy\triangle}}{\sqrt{3}K_{dyY}}$ 倍，即

$$N_Y S_Y=\sqrt{3}N_\triangle S_\triangle$$

$$W_Y=W_\triangle\frac{K_{dy\triangle}}{\sqrt{3}K_{dyY}}$$

式中：N_Y 和 $N_\triangle$——Y 部分和 △ 部分线圈的并绕根数；S_Y 和 $S_\triangle$——Y 部分和 △ 部分线圈单根导线的截面；W_Y 和 $W_\triangle$——一相 Y 部分和 △ 部分线圈串联总匝数；K_{dyY} 和 $K_{dy\triangle}$——Y 部分和 △ 部分线圈绕组系数。

满足匝数上的关系式，可以保证接上电源时绕组内部不产生环流；满足导线截面的关系式，可以保证 Y 和 △ 两部分线圈电流密度相同，从而使两部分绕组温升相同*。

第五节　不同跨距变极法

在槽矢量图能得到三相对称的条件下，单一绕组用两种不同跨距相结合，也可以达到变极目的。这种变极方法叫作变跨距法。用这种方法获得的单绕组三速电动机出线头为 9 根，比换相法少，分布系数也还高。

1. 不同跨距变极原理

以一只 36 槽电动机为例，欲绕成 2/4/8 极三速。排列绕组时如果选定 2 极为正规 60° 相带绕组，用庶极接法获得 4 极，那末用通常的反向法在 4 极的基础上再获得 8 极就不行了，但是用变跨距法却可以再获得 8 极。

图 4-60 画出了 2 极和 4 极时一相的槽电流图，图中实线为线圈上层边电流，虚线为下层边电流，跨距 $y=9$。

现在的问题是：如何在庶极接法的 4 极基础上再获得 8 极？为此我们仔细观察 4 极时的槽电流分布情况，如果设想 4、5、6、10、11、12 以及 22、23、24、28、29、30 这十二个槽内电

* 上海沪东电机厂生产的 JDO_3-140S-6/4/2 和 JDO_3-140M-6/4/2 单绕组三速异步电动机采用了 △ 接法的换相法，为减少工艺上的困难，各相 △ 部分和 Y 部分均取相同匝数和线规，其主要数据参见本书附录一。

流能反向成为图 4-61 所示，显然一相槽电流就形成了八个极(一相能形成 8 个极，三相合起来也必定能形成 8 个极)。

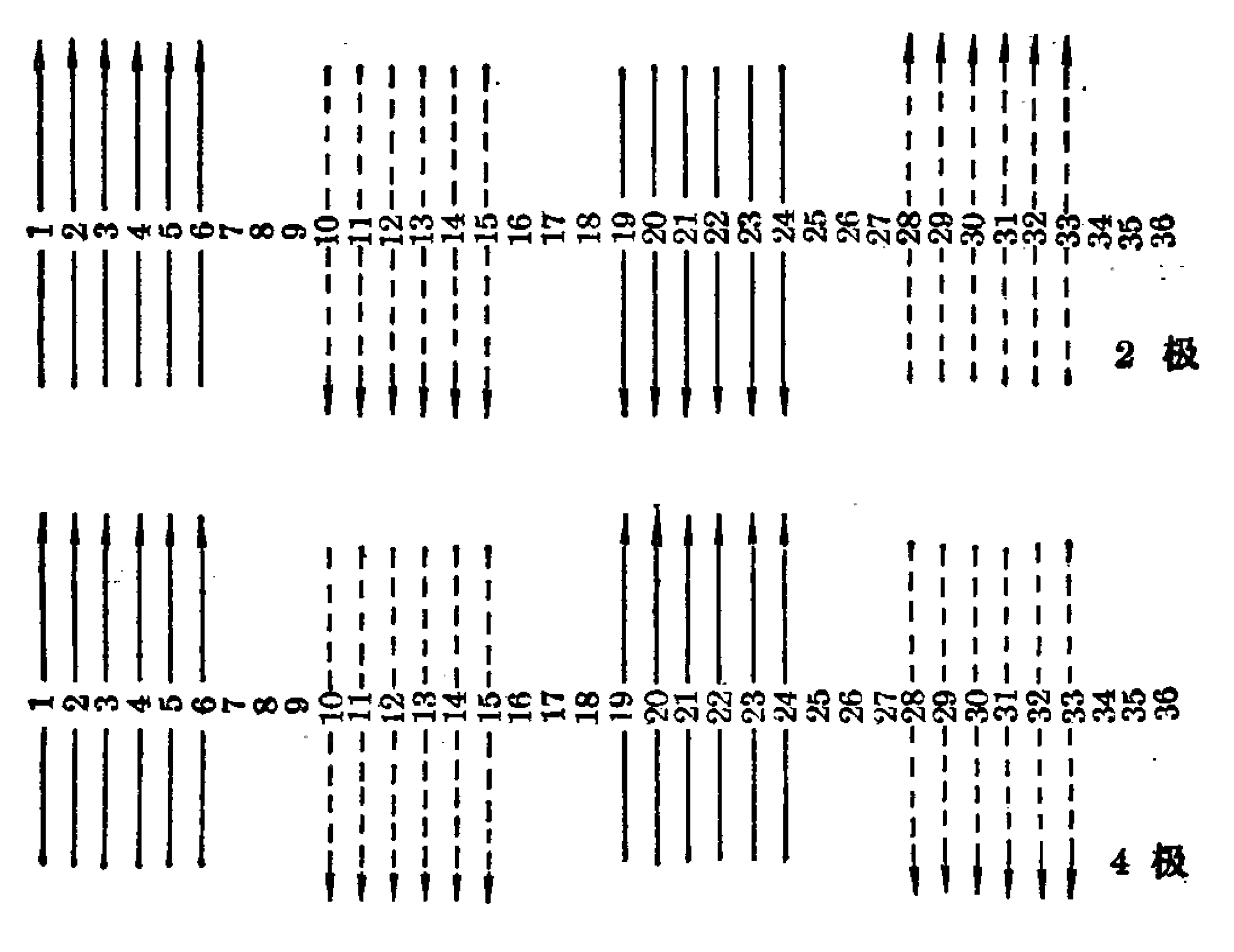


图 4-60　两极和四极的槽电流图

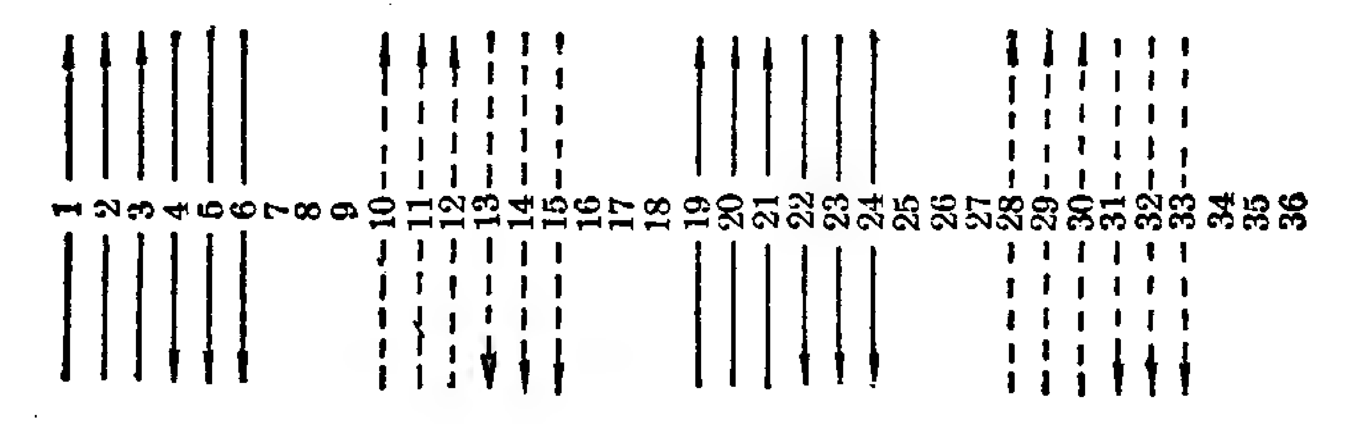


图 4-61　从图4-60的四极变为八极的原理(不同跨距变极法)

为了使 4、5、6、10、11、12 和 22、23、24、28、29、30 这十二个槽电流能反向，而其余十二个槽电流不反向，我们可以把 4、5、6 (上层边)和 10、11、12 (下层边)，22、23、24 (上层边)和 28、29、30 (下层边)，分别单独作为线圈组，剩下的 1、2、3 (上层边)和 13、14、15 (下层边)，19、20、21 (上层边)

和 31、32、33 (下层边) 当然也分别作为线圈组。于是前两个线圈组跨距 y 显然等于 6, 后两个线圈组跨距 y 显然等于12, 形成了两个不同的跨距。这种不同跨距对 2、4 极槽电流分布没有影响, 但却保证了在庶极接法的 4 极基础上能够再通过反向获得 8 极。

用变跨距法获得 8 极的 36 槽 2/4/8 极三速绕组排列表如下:

槽　号	①	②	③	4	5	6	⑦	⑧	⑨	10	11	12	⑬	⑭	⑮	16	17	18
2　极	a	a	a	a	a	a	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	b	b	b
4　极	a	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b	b
8　极	a	a	a	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-b$	$-b$	$-b$
槽　号	⑲	⑳	㉑	22	23	24	㉕	㉖	㉗	28	29	30	㉛	㉜	㉝	34	35	36
2　极	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	c	c	c	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$	$-b$
4　极	a	a	a	a	a	a	c	c	c	c	c	c	b	b	b	b	b	b
8　极	a	a	a	$-a$	$-a$	$-a$	c	c	c	$-c$	$-c$	$-c$	b	b	b	$-b$	$-b$	$-b$

注: 表中槽号带圈的y =12, 不带圈的 y=6。

2. 接线方法

用变跨距法获得的多速电动机绕组方案, 其不同跨距只是体现在绕制和嵌放线圈中。线圈的反向情况和前节所述反向法是一样的, 不论由 2 极变 4 极, 或 4 极变 8 极, 线圈电流都是一半反向, 因而接线方法和前节所述反向法的接线方法相同。对于三速电动机, 如采用 2Y/2Y/2Y 或 2△/2△/2Y, 其出线头为 9 根。

3. 绕组系数的计算

具有不同跨距的相绕组, 其分布系数也可以从槽矢量图

上一相矢量的分布情况中求出。

本例（36 槽，2/4/8 极）各种极数时的槽矢量图见第九章方案 24，分布系数分别为：

$$K_{d2}=\frac{4(\cos 5^\circ+\cos 15^\circ+\cos 25^\circ)}{12}$$

$$=\frac{0.996+0.966+0.906}{3}=0.956$$

$$K_{d4}=\frac{4(\cos 10^\circ+\cos 30^\circ+\cos 50^\circ)}{12}$$

$$=\frac{0.985+0.866+0.643}{3}=0.831$$

$$K_{d8}=\frac{4(\cos 10^\circ+\cos 30^\circ+\cos 70^\circ)}{12}$$

$$=\frac{0.985+0.866+0.342}{3}=0.731$$

2、4 极时线圈跨距 $y=9$，8 极时可等效地看成为由 3 只线圈组成的同心线圈，其平均跨距 $y=3$。因此

$$K_{y2}=\cos\frac{90^\circ}{2}=\cos 45^\circ=0.707$$

$$K_{y4}=\cos 0^\circ=1$$

$$K_{y8}=\cos\frac{1.5\times 40^\circ}{2}=\cos 30^\circ=0.866$$

最后得绕组系数为：

$$K_{dy2}=0.956\times 0.707=0.676$$

$$K_{dy4}=0.831\times 1=0.831$$

$$K_{dy8}=0.731\times 0.866=0.633$$

第五章　单绕组多速电动机的性能特点

本章所说的单绕组多速电动机性能并不是指电动机的所有性能，仅仅是指电动机的输出转矩和输出功率；所谓特点是指不同极数时的输出转矩的数量关系以及输出功率的数量关系。

一只三相单速异步电动机用变极方法经过改绕获得了多速，由于接线方法和绕组排列的不同，电动机在不同极数(即不同转速)时的输出转矩和输出功率也是不同的。但是，它们之间在数量上却大致有一定的关系，一般有恒功率、恒转矩和可变转矩三种情况。恒功率是指电动机在各种极数时的输出功率基本接近，由于输出机械功率(P)=输出转矩$(M)\times$转速(n)，因此必然转速高时转矩小，转速低时转矩大。恒转矩是指电动机在各种极数时的输出转矩基本接近，所以转速高时功率大，转速低时功率小。可变转矩则是介于恒功率和恒转矩两者之间的一种情况。

单绕组多速电动机的这种恒功率、恒转矩和可变转矩的性能特点具有一定的实际意义，因为根据生产机械的特点，对于变速也有不同的要求，一般也可分为恒功率、恒转矩和可变转矩三种情况。例如车床用双速电动机，它往往低速时负载重，要求转矩大，高速时负载轻，转矩可小些，因此对于这种变速要求具有恒功率特性。又如鼓风机或风扇类型机械，它需

要的转矩随着转速的降低而减小，这种变速要求属于可变转矩。另有些机械，不论转速如何，它的负载是不变的，这就要求变速具有恒转矩特性。我们在改绕时，应该根据使用时的变速要求，来决定改绕后的单绕组多速电动机应具有的性能特点。

第一节　电 势 公 式

为了便于分析单绕组多速电动机不同极数时的输出转矩的数量关系以及输出功率的数量关系，我们首先来分析电动机每相线圈感应电势 E 和每极磁通 ϕ 的关系。

电动机工作时，它的定子圆周上将形成一定极数的磁极，每个极在圆周上所占有的那段长度就是极距 τ，$\tau=\frac{\pi D}{2p}$（D 为定子铁心内径，p 为极对数）。在一个极距内的总磁通就是电动机的每极磁通量 ϕ。设 w_1、w_2……分别为一相的第一、第二……只线圈的匝数，则 w_1、w_2……匝线圈中都必定有磁通 ϕ 穿过，当线圈位于磁场北极时磁通如为 $+\phi$，位于南极时即为 $-\phi$。如图 5-1 所示。由于电动机工作时，磁通 ϕ 是旋转的（图中假定磁场向左移动）。因此，w_1（或 w_2……，下同）匝线圈必然由于线圈内磁通变化而产生感应电势。

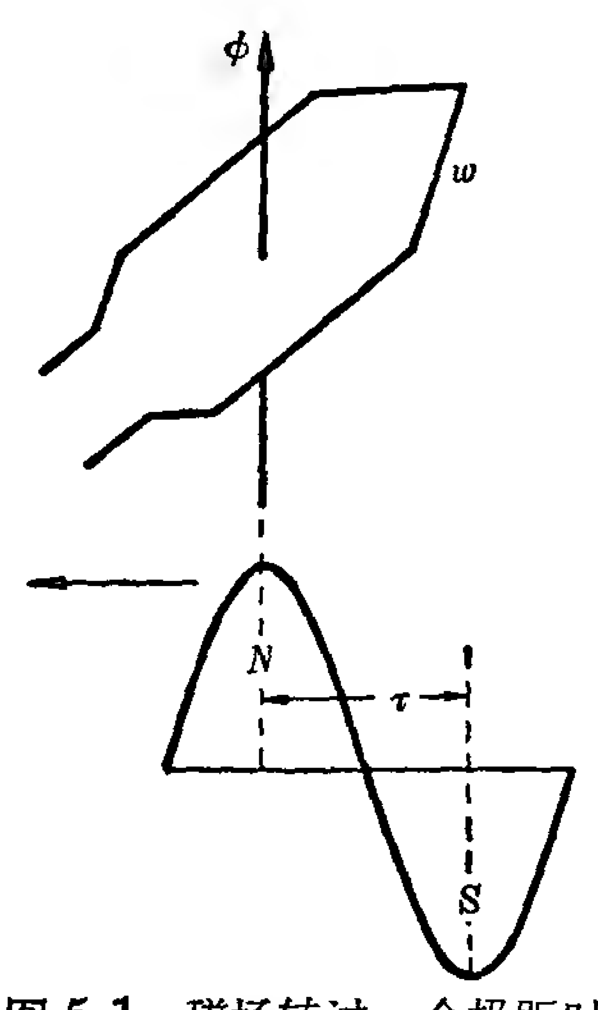


图 5-1　磁场转过一个极距时穿过线圈的磁通的变化

由图 5-1 可看出，对于 w_1 匝线圈来说，磁场转过一个极

距 τ(相当于 $T/2$ 时间)，线圈内磁通将由 ϕ 变为 $-\phi$，变化量 $\Delta\phi=\phi-(-\phi)=2\phi$。根据第一章介绍过的电磁感应定律可得 w_1 匝线圈内感应电势的平均值 E_{a_1} 为：

$$E_{a_1}=w_1\frac{\Delta\phi}{\Delta t}=w_1\frac{2\phi}{\frac{T}{2}}=4fw_1\phi$$

一相线圈由 w_1、w_2……等许多只线圈串联组成。设一相线圈串联总匝数为 w，则一相线圈感应电势的平均值 E_a 为：

$$E_a=4fw\phi$$

考虑到定子绕组是分布的，同时往往又是短距的，其感应电势是集中整距绕组的 K_{dy} 倍。所以就普遍情况来说定子绕组一相线圈感应电势平均值 E_a 应为：

$$E_a=4fw\phi K_{dy}$$

将 E_a 化成有效值 E 需乘以 1.11。于是得：

$$E=4.44fw\phi K_{dy}$$

再考虑到磁通 ϕ 的实用单位为麦克斯韦(简称"麦")，则由于单位换算的关系可得电势公式的最后形式：

$$\left.\begin{array}{l} E=4.44fw\phi K_{dy}\cdot 10^{-8} \\ \text{或}\quad E\cdot 10^{8}=4.44fw\phi K_{dy} \end{array}\right\} \tag{5-1}$$

式中 E 单位为"伏"，ϕ 单位为"麦"。此式是电机中一个重要的基本公式，改绕计算时就要用到。

公式中的 ϕ，实用上我们往往将它化成磁通密度 B。设一个极距内穿过磁通 ϕ 的面积为 S，则 $\phi=BS$。以气隙为例，面积 $S=\tau l=\frac{\pi D}{2p}l$($l$ 为定子铁心长度)，所以气隙磁通 $\phi_\delta=B_\delta\frac{\pi D}{2p}l$($B_\delta$ 为气隙磁密)。如果 B_δ 用最大值 $B_{m\delta}$ 表示，则

$\phi_\delta=\frac{2}{\pi}B_{m\delta}\frac{\pi D}{2p}l=B_{m\delta}\frac{Dl}{p}$，代入(5-1)式得：

$$E=4.44fwK_{dy}B_{m\delta}\frac{Dl}{p}\cdot10^{-8} \tag{5-2}$$

式中 $B_{m\delta}$ 的单位是高斯。

相线圈产生的感应电势 E，其主要作用是平衡加于相线圈上的电源电压 U。在大概计算时，可以认为 $E=U$。精确计算时，应该考虑到线圈的电阻压降以及漏电感引起的漏抗压降。因此，真正被相线圈感应电势所平衡的电压，应该是电源电压 U 乘以一个系数 K_E，即 $E=K_EU$，K_E 称作压降系数，其数值小于1，一般取0.88～0.97，极数多、功率小时取小值，极数少、功率大时取大值*。

第二节　单绕组多速电动机的转矩特性和功率特性

现在我们来估算单绕组多速电动机在不同极数时输出转矩的数量关系以及输出功率的数量关系。由于 $P=M\cdot n$，不同极数的转速 n 的数量关系又是固定的，因此不同极数时的输出功率间的数量关系完全取决于输出转矩间的数量关系。只要弄清楚输出转矩间的关系，输出功率间的数量关系也就迎刃而解了。

根据第二章分析，异步电动机的转矩有以下关系：

$$M=\frac{1}{\sqrt{2}}p\phi m_1w_1K_{dy_1}I_2'\cos\phi_2$$

我们以角标 II 表示多极数的量，角标 I 表示少极数的量，并忽略 $\cos\phi_{2II}$ 和 $\cos\phi_{2I}$ 的差别，则

$$\frac{M_{II}}{M_I}=\frac{w_{II}I_{2II}'K_{dyII}p_{II}\phi_{II}}{w_II_{2I}'K_{dyI}p_I\phi_I}$$

* 600瓦以下微电机压降系数 K_E 有的可取到0.88以下。

式中 $p_{II}\phi_{II}=B_{m\delta II}Dl$, $p_I\phi_I=B_{m\delta I}Dl$, 所以

$$\frac{M_{II}}{M_I}=\frac{w_{II}I'_{2II}K_{dyII}B_{m\delta II}}{w_I I'_{2I}K_{dyI}B_{m\delta I}} \tag{5-3}$$

如果我们忽略低速时通风条件较差的因素，则两种极数的安匝数可认为近似相等，即

$$w_{II}I'_{2II}\approx w_I I'_{2I}$$

于是得

$$\frac{M_{II}}{M_I}\approx\frac{K_{dyII}B_{m\delta II}}{K_{dyI}B_{m\delta I}} \tag{5-4}$$

又根据(5-2)式可得：

$$B_{m\delta II}=\frac{p_{II}E_{II}\cdot10^8}{4.44fw_{II}K_{dyII}Dl}$$

$$B_{m\delta I}=\frac{p_I E_I\cdot10^8}{4.44fw_I K_{dyI}Dl}$$

由此求得两种极数时的气隙磁密幅值比为

$$\frac{B_{m\delta II}}{B_{m\delta I}}=\frac{p_{II}E_{II}w_I K_{dyI}}{p_I E_I w_{II}K_{dyII}} \tag{5-5}$$

将(5-5)式代入(5-4)式得两种极数的转矩比为

$$\frac{M_{II}}{M_I}\approx\frac{p_{II}E_{II}w_I}{p_I E_I w_{II}} \tag{5-6}$$

(5-6) 式中极对数比值 $\frac{p_{II}}{p_I}$ 是固定的；比值 $\frac{E_{II}}{E_I}$ 和 $\frac{w_I}{w_{II}}$ 取决于绕组接法。相电势 E 值取决于绕组为 Y 还是 △ 接法，对 380 伏动力电网来说，Y 接法时 E 等于 220 伏，△ 接法时 E 等于380 伏(估计性能时，可粗略地认为 $E=U$，即 $K_E=1$)；匝数比 $\frac{w_I}{w_{II}}$ 取决于绕组在两种极数时是串联还是并联。

从(5-6)式我们看出：在既定的极数比和忽略不同极数时转子功率因数的差别以及忽略低速通风条件较差的条件下，

单绕组多速电动机的性能特点将取决于绕组的接法。因此，我们在改绕时，应该根据使用场合的变速要求，采用与此相应的绕组接法。

两种极数时的功率比为：

$$\frac{P_{II}}{P_I}=\frac{M_{II}}{M_I}\cdot\frac{n_{II}}{n_I} \tag{5-7}$$

式中多极数时通风条件差以及 $\cos\varphi\cdot\eta$ 值下降对功率的影响未考虑在内。如考虑此影响，多极数时功率应适当降低，即须打一折扣，大致估算时可取系数 0.6～0.9，近极比(6/4、8/6 极等)以及 4/2 倍极比取较大值，远极比(8/2 极等)以及 12/6 倍极比(尤其是功率小的)取较小值。

第三节　特性分析举例

1. 倍极比双速电动机的特性

我们举几个不同槽数、极数的电动机为例来分析。

(1) 24 槽 2/4 极双速电动机的特性

1) 2Y/Y 接法：此时，E_4、E_2 都等于 220 伏。由于 2 极时为两路并联，4 极时为一路串联，所以 $\frac{w_2}{w_4}=\frac{1}{2}$，由此得转矩和功率比：

$$\frac{M_4}{M_2}\approx\frac{p_4\cdot E_4\cdot w_2}{p_2\cdot E_2\cdot w_4}=2\times\frac{220}{220}\times\frac{1}{2}=1$$

$$\frac{P_4}{P_2}=\frac{n_4}{n_2}\cdot\frac{M_4}{M_2}\approx\frac{1}{2}\times1=0.5$$

由上可知在这种情况下得到的是恒转矩特性；

2) 2Y/2Y 接法：

$$\frac{M_4}{M_2}\approx2\times1\times1=2 \qquad \frac{P_4}{P_2}\approx\frac{1}{2}\times2=1$$

由此可知在这种情况下得到的是恒功率特性；

3) 2Y/△ 接法：

$$\frac{M_4}{M_2} \approx 2 \times \frac{380}{220} \times \frac{1}{2} = \sqrt{3} = 1.732,$$

$$\frac{P_4}{P_2} \approx \frac{1}{2} \times \sqrt{3} = 0.866$$

4) △/2Y 接法：

$$\frac{M_4}{M_2} \approx 2 \times \frac{220}{380} \times 2 = 4 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 2.3,$$

$$\frac{P_4}{P_2} \approx \frac{1}{2} \times 2.3 = 1.15$$

5) 2△/Y 接法：

$$\frac{M_4}{M_2} \approx 2 \times \frac{220}{380} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577,$$

$$\frac{P_4}{P_2} \approx \frac{1}{2} \times 0.577 = 0.288$$

以上三种接法得到的是可变转矩特性。

(2) 36 槽 4/8 极双速电动机的特性

以 2Y/Y 接法为例按上述方法分析，得

$$\frac{M_8}{M_4} \approx \frac{p_8 E_8 w_4}{p_4 E_4 w_8} = 2 \times \frac{220}{220} \times \frac{1}{2} = 1,$$

$$\frac{P_8}{P_4} = \frac{n_8}{n_4} \cdot \frac{M_8}{M_4} \approx \frac{1}{2} \times 1 = 0.5$$

可见和 24 槽 2/4 极 2Y/Y 接法的数值一样。用同法分析其余四种接法，结果也一样。

由以上两例，可归纳出单绕组倍极比双速电动机的特性如表 5-1 所示。此表可供改绕时参考。

	极数(2p) I	极数(2×2p) II	转矩比	功率比	特性
	联结方法	联结方法	M_{II}/M_I	p_{II}/p_I	
1	2Y	Y	1	0.5	恒转矩
2	2Y	2Y	2	1	恒功率
3	2Y	△	1.732	0.866	可变转矩
4	△	2Y	2.3	1.15	可变转矩
5	2△	Y	0.577	0.288	可变转矩

表中接法 1 为恒转矩；接法 2 为恒功率；接法 3、4 为接近恒功率的可变转矩，其中接法 3 高速时输出功率大于低速，接法 4 正好相反；接法 5 为可变转矩，适用于要求高速时输出功率大，低速时输出功率小的场合。

2. 非倍极比双速电动机的特性

也举几个不同槽数、极数的电动机为例分析。

(1) 24 槽 4/6 极双速电动机的特性

如上所述仍以五种绕组接法时的性能来分析，可得如下结果：

1) 2Y/Y 接法：

$$\frac{M_6}{M_4}\approx\frac{p_6E_6w_4}{p_4E_4w_6}=\frac{3}{2}\times1\times\frac{1}{2}=0.75,$$

$$\frac{P_6}{P_4}=\frac{M_6}{M_4}\cdot\frac{n_6}{n_4}\approx0.75\times\frac{2}{3}=0.5$$

2) 2Y/2Y 接法：

$$\frac{M_6}{M_4}\approx\frac{3}{2}\times1\times1=1.5,$$

$$\frac{P_6}{P_4}\approx\frac{3}{2}\times\frac{2}{3}=1$$

3) 2Y/△ 接法：

$$\frac{M_6}{M_4} \approx \frac{3}{2} \times \sqrt{3} \times \frac{1}{2} = 1.3,$$

$$\frac{P_6}{P_4} \approx 1.3 \times \frac{2}{3} = 0.866$$

4) △/2Y 接法：

$$\frac{M_6}{M_4} \approx \frac{3}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times 2 = 1.732,$$

$$\frac{P_6}{P_4} \approx 1.732 \times \frac{2}{3} = 1.154$$

5) 2△/Y 接法：

$$\frac{M_6}{M_4} \approx \frac{3}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{1}{2} = 0.433,$$

$$\frac{P_6}{P_4} \approx \frac{2}{3} \times 0.433 = 0.288$$

(2) 36 槽 6/8 极双速电动机的特性

五种绕组接法时性能特点如下：

1) 2Y/Y 接法：

$$\frac{M_8}{M_6} \approx \frac{p_8 E_8 w_6}{p_6 E_6 w_8} = \frac{4}{3} \times 1 \times \frac{1}{2} = 0.67,$$

$$\frac{P_8}{P_6} \approx \frac{3}{4} \times \frac{2}{3} = 0.5$$

2) 2Y/2Y 接法：

$$\frac{M_8}{M_6} \approx \frac{4}{3} \times 1 \times 1 = 1.33,$$

$$\frac{P_8}{P_6} \approx \frac{3}{4} \times \frac{4}{3} = 1$$

3) 2Y/△ 接法：

$$\frac{M_8}{M_6}\approx\frac{4}{3}\times\sqrt{3}\times\frac{1}{2}=1.154,$$

$$\frac{P_8}{P_6}\approx\frac{3}{4}\times\frac{2\sqrt{3}}{3}=0.866$$

4) △/2Y 接法：

$$\frac{M_8}{M_6}\approx\frac{4}{3}\times\frac{1}{\sqrt{3}}\times2=1.54,$$

$$\frac{P_8}{P_6}\approx\frac{3}{4}\times\frac{8}{3\sqrt{3}}=1.154$$

5) 2△/Y 接法：

$$\frac{M_8}{M_6}\approx\frac{4}{3}\times\frac{1}{\sqrt{3}}\times\frac{1}{2}=0.385$$

$$\frac{P_8}{P_6}\approx\frac{3}{4}\times\frac{2}{3\sqrt{3}}=0.288$$

由以上两例归纳出单绕组非倍极比双速电动机的特性如表 5-2。

非倍极比单绕组双速电动机的特性　　表 5-2

	极 数 I	极 数 II	功 率 比	性 能 特 点
	联结方法	联结方法	p_{II}/p_{I}	
1	2Y	Y	0.5	可变转矩
2	2Y	2Y	1	恒 功 率
3	2Y	△	0.866	可变转矩
4	△	2Y	1.154	可变转矩
5	2△	Y	0.288	可变转矩

表中接法 2 为恒功率；接法 3、4 虽为可变转矩，但接近恒功率；接法 1、5 适用于要求高速输出功率大、低速输出功率小的场合。

3．三速以上单绕组多速电动机的特性

对于一般 Y，△ 接法（不论一路、两路、三路）的三速以上电动机，可按每两个极数仿分析双连电动机的方法来分析其特性。例如对于一台 2/4/6 极三速电动机，可以先分析 2/4 极时的转矩比和功率比，再分析 4/6 极时的转矩比和功率比，于是 2、4、6 三种极数的特性就全部清楚了。

第六章　单绕组多速电动机的改绕步骤和计算

本书讨论的对象是三相鼠笼式异步电动机，这种电机的极数完全取决于定子绕组，因此以下所谈的改绕及其计算都是指定子绕组而言。

第一节　改 绕 步 骤

单速异步电动机改绕成多速，一般可以按以下步骤进行。

1）物色被改电动机：

物色被改电动机主要应考虑以下几点：

① 极数：选择极数应尽量接近改绕后所需极数，因远极比的多速电动机性能较之近极比总要差些。对于双速电动机，改绕时以提高转速为好，例如对于2/4极多速电动机以物色4极，对于4/6极多速电动机以物色6极改绕为好。三速电动机则原电机极数最好为改后三速的中间极数，例如对于2/4/6极以物色4极为好，对于4/6/8极物色6极为好。

如果用旧壳绕制，旧壳铭牌又不清，则可参照下列国产电动机数据大致判断其极数（式中D——定子铁心内径，$D_{外}$——定子铁心外径）：

J 型
JO 型

- 两极 $\frac{D}{D_{外}}=0.50\sim0.57$
- 四极
  - 0.2～2.8 千瓦 $\frac{D}{D_{外}}=0.585\sim0.60$
  - 4.5～55 千瓦 $\frac{D}{D_{外}}=0.62\sim0.64$
- 六极
  - 2.8 千瓦以下 同四极比值
  - 2.8～75 千瓦 $\frac{D}{D_{外}}=0.66\sim0.71$
- 八极
  - 1.7 千瓦以下 同六极比值
  - 1.7～14 千瓦 $\frac{D}{D_{外}}=0.72\sim0.75$

JO_2 型

- 两极 $\frac{D}{D_{外}}=0.532\sim0.56$(0.8～30 千瓦)
- 四极 $\frac{D}{D_{外}}=0.62\sim0.66$(0.6～30 千瓦)
- 六极
  - $\frac{D}{D_{外}}=0.625\sim0.65$(0.6～1.1 千瓦)
  - $\frac{D}{D_{外}}=0.68\sim0.72$(1.5～22 千瓦)
- 八极 $\frac{D}{D_{外}}=0.65\sim0.71$(0.8～17 千瓦)

JO_3 型

- 两极 $\frac{D}{D_{外}}=0.535\sim0.565$(1.1～18.5 千瓦)
- 四极 $\frac{D}{D_{外}}=0.625\sim0.66$(0.75～18.5 千瓦)
- 六极
  - $\frac{D}{D_{外}}=0.625\sim0.65$(0.55～1.1 千瓦)
  - $\frac{D}{D_{外}}=0.65\sim0.715$(1.1～15 千瓦)
- 八极 $\frac{D}{D_{外}}=0.67\sim0.715$

除参考上列数据外也可按下式来大致估算极数：

$$极数 \approx (0.34\sim0.4)\frac{齿宽\times定子槽数}{轭高}$$

此式对国产中小型电动机大致适用，括弧内系数功率大者取大值，小者取小值。

② 功率：被改电动机功率应选择得比改后同极数所需功率为大，因为一般情况下在相同极数下改后电动机功率往往比原电动机功率小。

③ 定、转子槽数：定、转子槽数要拆下电动机端盖，抽出转子才能数出。

观察定子槽数目的是决定在此槽数下按照改后所需极数能否得出一对称的三相绕组。这对整数槽绕组不存在问题，问题是在于分数槽绕组，因为分数槽绕组要能得出对称的三相绕组和定子槽数有一定的关系。这里介绍一种简单的判断方法。用它可以迅速地判断出在一定的槽数和极数下能否得出对称的三相分数槽绕组。和前章一样，我们仍以 z_1 表示定子槽数，p 表示极对数，m 表示相数。为了作出判断，可先求出 z_1 和 p 的最大公约数 t，然后以 z_1 除以 t 和 m 的乘积，看式 $\frac{z_1}{tm}$ 是否为整数，如是则可得出对称绕组，如否则不能得出对称绕组。

【例一】 一只电动机定子为 36 槽，欲绕成 4/8 极双速，试判断各极数下能否得出三相对称绕组。

4 极时：$q=\frac{z_1}{2pm}=\frac{36}{4\times3}=3$，为整数槽绕组，肯定可得到对称绕组；

8 极时：$q=\frac{36}{8\times3}=\frac{36}{24}=1\frac{1}{2}$，为分数槽绕组；为了作

出判断，求$z_1=36$和$p=4$的最大公约数t，$t=4$，于是$\frac{z_1}{t\cdot m}=\frac{36}{4\times3}=3$，为整数，因此可肯定8极也能得出对称绕组。本书第九章绕组方案4就是此种情况。

【例二】 一只电动机定子24槽，欲绕成4/6极双速，试判断能否得出对称绕组。

4极时：$q=\frac{24}{4\times3}=2$，能得出对称绕组；

6极时：$q=\frac{24}{6\times3}=\frac{24}{18}=1\frac{1}{3}$，因$p=3$，$z_1=24$，$t=3$。$\frac{z_1}{tm}=\frac{24}{3\times3}\neq$整数，因此6极时不能得出对称绕组。

观察转子槽数的目的，是考虑它与定子槽数的配合在所需极数以及既定的绕组方案下是否适当。如果槽配合不当，对电动机起动性能将有不良影响，严重时会起动不出，采用非正规分布绕组时这种影响可能更比较严重，因此更应注意槽配合。

关于定、转子槽配合对电动机性能的影响详见第八章。本书附录一所列国产单绕组多速电动机所用槽配合数据以及本章改绕实例的槽配合数据可供读者改绕时参考。

2）对被改电动机进行空载试验，记下试验电压及空载电流。

3）根据被改电动机槽数排出所需的多速单绕组方案，并根据使用场合的变速要求初步决定绕组接法。方法在第四章中已有叙述。

各种绕组方案的绕组系数一般有两种情况：一是各种极数时的绕组系数较接近，二是各种极数时的绕组系数相差较大。如果从功率上考虑，要求改绕后各种极数时的出力较接近，此时应选用前一种情况的绕组方案；如要求不同极数时的

转矩接近(即低速时要求出力不高)可选用后一种情况的绕组方案。

4) 拆除旧绕组,记录测量原数据：旧绕组可用通低压大电流的方法加热拆除,禁止用火,尤其是用喷灯烧,因为火烧会降低铁心的导磁性能并增加其损耗。

记录、测量原数据是为了计算以及改后进行性能对比的需要。这一步很重要,应该多测几次,力求正确。如果数据搞错,计算就跟着全错,改绕就可能导致失败,既浪费工时,又浪费器材。

原数据记录、测量的项目一般应包括以下各项：① 额定电压 $U_{额}$; ② 额定电流 $I_{额}$; ③ 容量 P; ④ 转速 n; ⑤ 接法;(以上五项可以从铭牌上查得。) ⑥ 定子铁心外径 $D_{外}$; ⑦ 定子铁心内径 $D_{内}$(以下用符号 D 表示); ⑧ 定子铁心长度 l; ⑨ 轭高 h_c; ⑩ 齿宽 b_t; ⑪ 每槽导体数 S_n; ⑫ 裸线线径; ⑬ 跨距; ⑭ 绕组型式——双层绕组或单层绕组, 链形或同心绕组等; ⑮ 并绕根数 N; ⑯ 定、转子槽数 z_1、z_2。以上各项需将电动机拆开,有的尚需拆除旧绕组后才能测得。

测量定子铁心齿宽时对于平行齿(齿的两边互相平行)取实际宽度。对于非平行齿可取离最狭处 1/3 齿高处的宽度为计算值,见图 6-1 和图 6-2。

测量轭高时, 对于图 6-1 的圆底槽, $h_c=\frac{D_{外}-D}{2}-h_s+\frac{1}{3}R$; 对于图 6-2 的平底槽, $h_c=\frac{D_{外}-D}{2}-h_s$。

5) 计算原电动机各部分磁通密度：计算公式见下一节; 计算出的数据有很大参考价值。改绕后各极数下各部分磁通密度只要不超过此值,电动机必能正常工作。

6) 进行改绕计算。

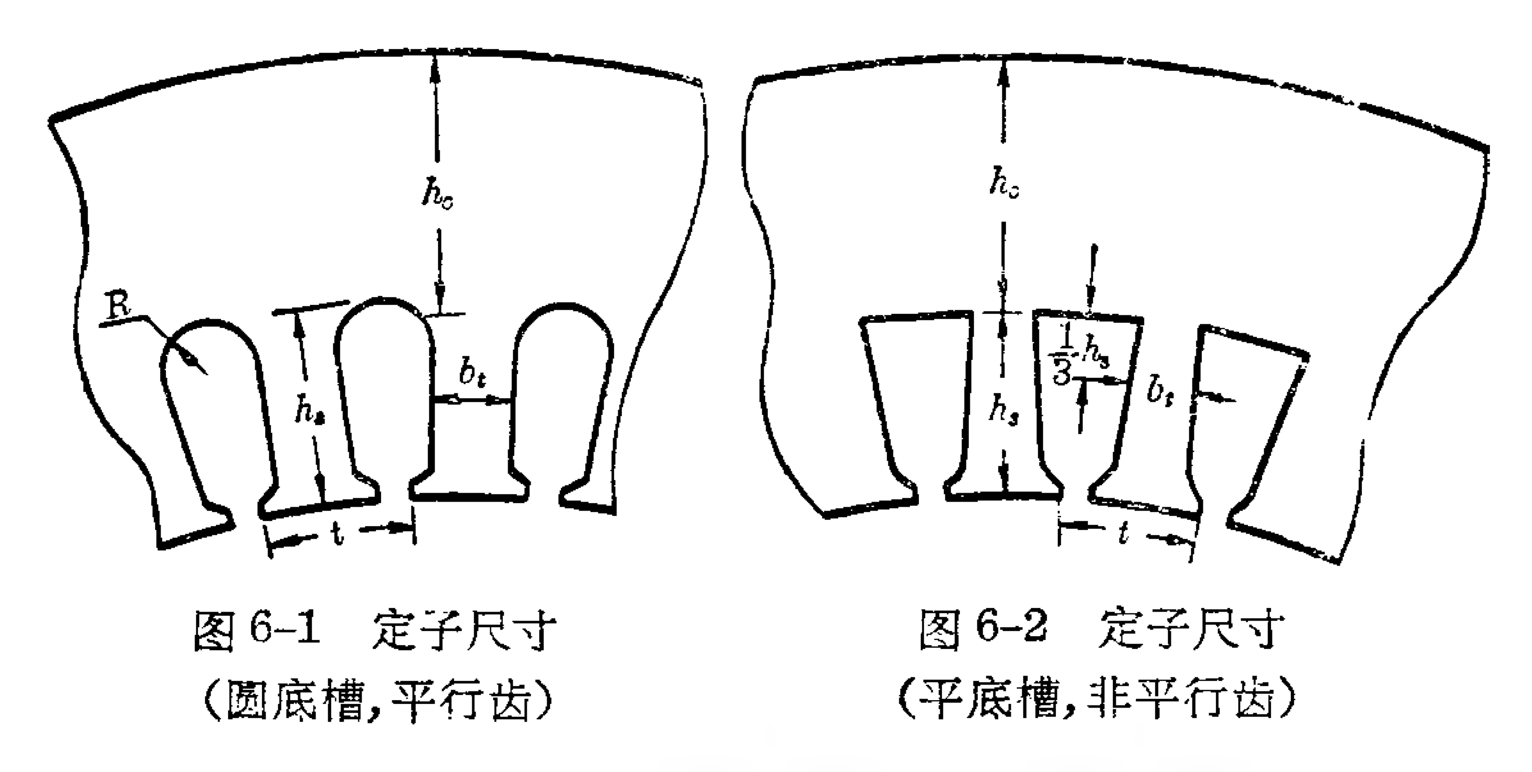


图 6-1　定子尺寸
（圆底槽，平行齿）

图 6-2　定子尺寸
（平底槽，非平行齿）

7）根据计算出的多速绕组数据，绕出新线圈，嵌好并接好绕组。

8）对改绕后电动机进行空载试验：一般情况下主要是测一下空载电流、转速和三相电流是否对称。如空载电流太大，说明磁路饱和严重（磁通密度高），应该检查原因，重新计算绕制，再行试验。

空载电流的数值很难完全确定，它和所取的绕组方案、电动机极数、磁路中磁密高低均有关系。绕组方案主要是涉及磁势曲线，曲线谐波多，空载电流相应也大。电动机极数（同样绕组方案条件下）愈多，空载电流也愈大。磁路磁密愈高，空载电流也愈大。一般情况下，若空载电流为额定电流的30～60%，均可进行负载试验。

如果测试仪器较齐全，不妨多测一些性能数据（包括负载情况下的性能），这样对改后电动机可以有更多的了解。测试方法请参考有关材料，本书不多述。

测转速时，往往同一极数时改后电动机转速比原转速稍低，这也是容易理解的。因为改绕后，为了照顾另一极数时的出力，往往同极数的磁密比原电动机的略有降低，所以出力也

降低，转矩曲线就比原电动机为低，如图 6-3 所示。由图可知，在相同负载条件下，工作点必向左移，转差增大，转速降低。

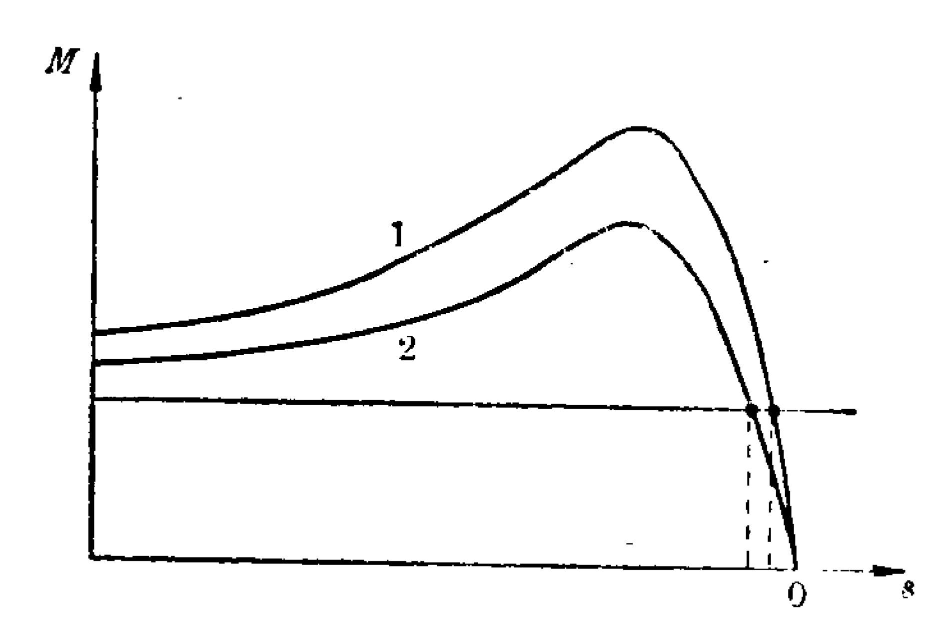


图 6-3　电动机改成多速后同极数转矩曲线的变化

1—改绕前；2—改绕后

9）负载试验：负载试验目的是观察在负载条件下电动机能否起动到正常转速以及振动噪音是否严重，温升是否正常。如果试验时发现电动机停留在低速运行，则要用转速表测出该转速的数值，以便根据第八章的分析采取相应措施。

10）浸漆、烘烤、安装：方法可参考有关书籍。

毛主席教导我们：“**一成不变的东西是没有的**”，以上所说的改绕步骤也不是死板的，实际进行时可以根据具体情况灵活运用。

第二节　改绕计算公式和方法

1．改绕计算的必要性

改绕计算主要是计算电动机磁路各部分磁通密度数值，不使其过大而致铁心严重饱和。电动机的磁路如图 6-4，由图可知，磁路由定子铁心轭部、齿部、气隙以及转子铁心各部

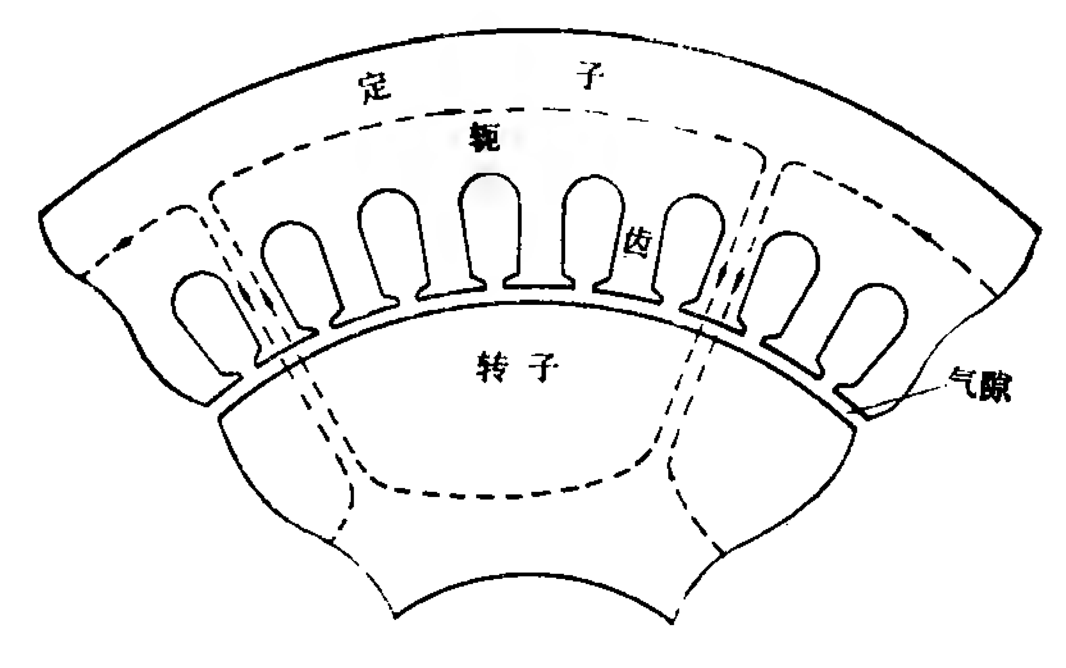


图 6-4　电动机的磁路

分组成(转子铁心也有齿部，轭部两部分，图中未画出)。由于改绕只涉及定子部分，因此改绕计算也只涉及气隙与定子铁心轭部、齿部三个磁通密度数值的计算。

我们知道铁心线圈通以电流后，线圈的铁心会产生磁通而被磁化。在一定范围内，随着线圈内电流的增大，铁心内磁通ϕ也会较快地增大。但超过一定数量界限后，电流再增大，铁心内磁通的增长就会变得缓慢，并且以后会变得更加缓慢(这种情况就叫做开始饱和)，直到最终停止增长，此时铁心即完全饱和。

异步电动机中定子线圈也是绕在铁心上的，定子线圈通以电流时电机内部也会磁化而产生磁通。用来产生链绕定、转子磁通即电机主磁通(磁路见图 6-4)的电流叫作电机的激磁电流。当电动机空载时，因为它不拖动负载，空载电流几乎全用在磁化气隙和铁心上，因此可以近似认为电动机的空载电流就等于激磁电流。

在线圈匝数一定的条件下，表示电机每极磁通量与线圈内激磁电流两者之间变化关系的曲线叫作电机的"磁化曲线"，其一般形状如图 6-5。曲线开始部分近似直线，原因是铁

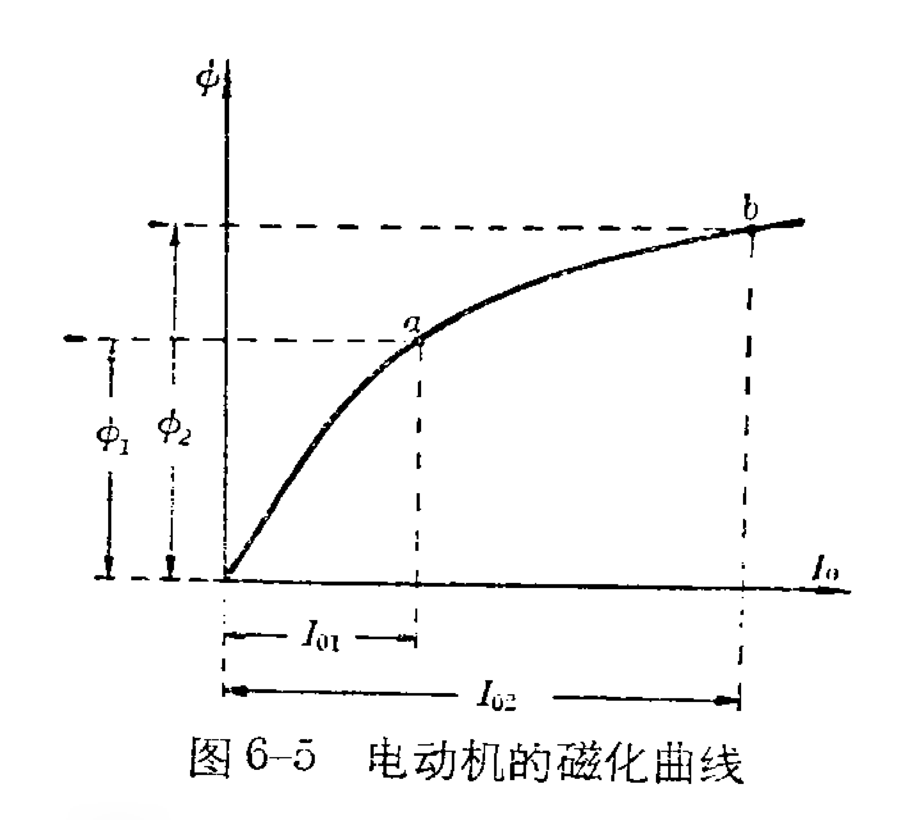


图 6-5　电动机的磁化曲线

心未饱和，激磁磁势几乎全消耗在气隙上。以后由于铁心开始饱和，曲线即呈现弯曲。一般电机在额定电压且无载时其磁化曲线的工作点常选在开始弯曲处，如图 6-5 中 a 点所示。这样可以比较充分地利用铁心材料，提高经济性能。

由图 6-5 可以看出，铁心内磁通过大就会引起激磁电流 I_0 大量增加。正常时工作于 a 点，此时磁通为 ϕ_1，激磁电流为 I_{01}。如改绕后数据不当（例如匝数过少），引起磁路中磁通增大为 ϕ_2，激磁电流即变为 I_{02}，I_{02} 比起 I_{01} 增大很多，空载试验时电流就必然很大。在这种情况下，电动机不能正常运转，必须重绕。因此改绕前进行必要的计算，以便确定铁心轭部和齿部适当的磁通密度值，对于避免返工以及充分利用铁心材料是很有必要的。

应当指出，饱和仅仅是对铁心，即对磁路中齿部和轭部而言。对于气隙，由于空气磁化曲线是一根直线，因此不存在饱和问题。

2. 几个基本数据的概念

为了得到下面的磁通密度计算公式，这里先解决几个基本数据的概念及其计算。

1）极距 τ

前面已经讲过，极距 τ 就是一个极在气隙圆周上所占的长度。气隙圆周全长 $=\pi D$，极数为 $2p$，所以

$$\tau=\frac{\pi D}{2p} \tag{6-1}$$

2）齿距 t

齿距 t 表示相邻两齿之间在铁心圆周上间隔的长度（参看图 6-1 和图 6-2）。由于铁心齿数等于槽数，所以：

$$t=\frac{\pi D}{z_1} \tag{6-2}$$

3）每槽导体数 S_n

它就是一个槽内所嵌入的导体根数。对于单层绕组，它就是一只线圈的匝数。对于双层绕组，一只线圈匝数等于 $\frac{S_n}{2}$。

4）并绕根数 N

功率较大的电动机，由于电流较大，一根导线的截面有限，所以常用几股导线并成一根使用。并绕根数就是指所并的股数。

5）每相串联匝数 w

我们知道定子绕组是由许多只线圈联接而成的。对于三相绕组来说，每一相都占有只数相等的线圈，线圈之间接成串联或并联。每相串联匝数 w 指的是一相内全部串联线圈的总匝数，也就是一相串联的全部线圈只数与每只线圈匝数的乘积。如果一相线圈中有并联接法（如接成两路 △ 或两路 Y），则 w 是指一路的总匝数，不要弄错。

w 和 S_n 之间有一定数量关系。实用上，我们最先得到的总是每槽导体数 S_n，然后再计算出 w。

将 S_n 乘以槽数 z_1，即得铁心内所嵌的全部导体根数。将此乘积除以相数 m，即得每相所占总导体数 $=\frac{S_n z_1}{m}$。由于一匝线圈有两根导线(元件边)，所以每相匝数 $=\frac{S_n z_1}{2m}$，再除以并联路数 a 即得每相串联匝数 w。

$$w=\frac{S_n z_1}{2ma} \tag{6-3}$$

3．磁通密度的计算

(1) 气隙磁通密度 $B_{m\delta}$

计算气隙磁通密度 $B_{m\delta}$ 时，要用到第五章中得出的电势公式(5-1)：

$$K_E U=4.44 f w K_{dy} \phi \cdot 10^{-8}$$

式中 ϕ 为每极磁通量，单位是麦；U 为电源相电压，单位是伏；K_E 为压降系数，数值取 0.88～0.97(功率小、极数多取小值；功率大、极数少取大值)。

由图 6-4 可知气隙中一个极的面积 $S_\delta=\tau l$，因此

$$\phi=S_\delta B_\delta=\tau l B_\delta \tag{6-4}$$

式中 B_δ 为一个极距内气隙磁通密度的平均值，见图 6-6(a)。实际计算时用的是气隙磁通密度最大值 $B_{m\delta}$，如以 $B_{m\delta}$ 代替

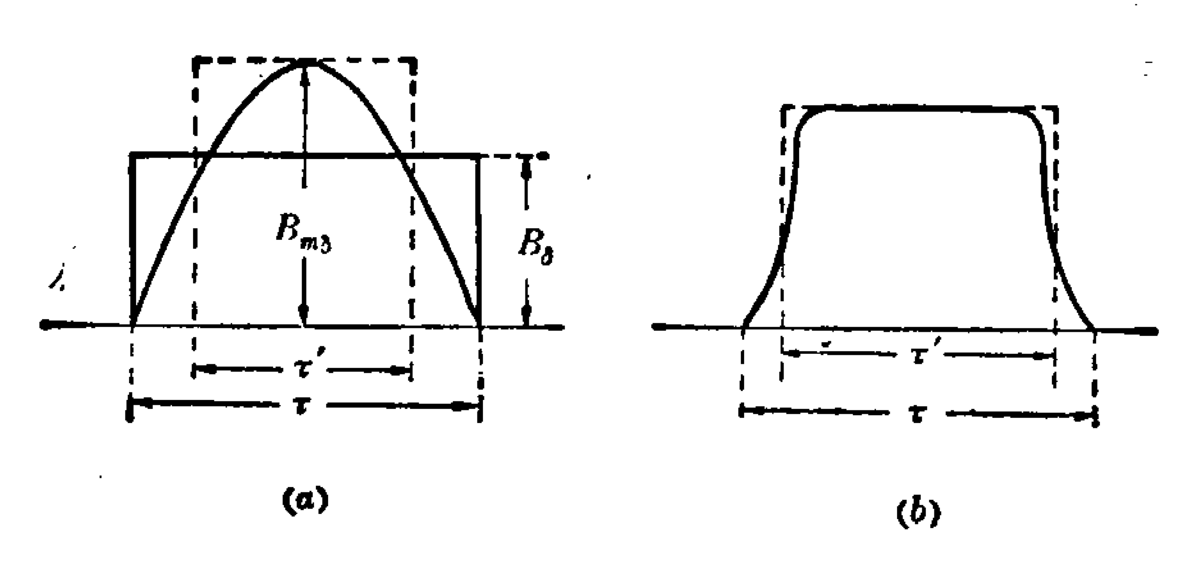


图 6-6　一个极距内气隙磁通密度分布

(6-4)式中的 B_δ, 极距 τ 就应该代之以 τ'(见图 6-6(a), 图中面积 $B_{m\delta}\tau'=B_\delta\tau$), 即得

$$\phi=\tau' l B_{m\delta}$$

式中 τ' 为极距计算长度, $\tau'=\alpha_\delta\tau$, α_δ 为极距系数, 在理想情况下, 即一个极距长度上各点气隙磁密按正弦形分布时, $\alpha_\delta=\frac{2}{\pi}=0.637$。实际电动机由于磁路铁心部分局部饱和, 气隙磁密分布有点"扁平"(见图 6-6(b)), 因此, α_δ 大于 0.637。磁路饱和愈重 α_δ 数值愈大。考虑到改绕情况可以允许有一定误差, 为计算方便, 本书就统一取 $\alpha_\delta=0.7$, 由此可得:

$$\phi=0.7\tau l B_{m\delta} \tag{6-5}$$

式中 ϕ 单位为"麦", $B_{m\delta}$ 单位为"高斯", τ、l 单位均为厘米。将(6-5)式代入电势公式得:

$$K_E U\times 10^8=0.7\times 4.44 f w K_{dy}\tau l B_{m\delta}$$

以 $f=50$ 代入得:

$$K_E U\times 10^8=0.7\times 222 w K_{dy}\tau l B_{m\delta}=155.4 w K_{dy}\tau l B_{m\delta}$$

如果 τ、l 单位均用毫米, 则得:

$$K_E U\times 10^8=1.55 w K_{dy}\tau l B_{m\delta}$$

整理后即得气隙磁通密度的计算公式:

$$B_{m\delta}=\frac{K_E U\cdot 10^8}{1.55 w K_{dy}\tau l} \tag{6-6}$$

式中单位: $B_{m\delta}$——高斯; U——伏; τ、l——毫米。

由上式看出, 在定子铁心及绕组方案和接法一定的情况下, 气隙磁密完全取决于每相串联匝数 w。

(2) 齿部磁通密度 B_{mt}

由图 6-4 看出, 经过气隙的磁通将平行进入定子铁心的

齿部及槽部。由于齿部铁心的导磁能力比槽内空气大得多，所以异步电动机中通常可以忽略槽内的磁通，而认为穿过气隙的磁通全部进入定子铁心齿部。

每个齿的截面积等于 $b_t l$。实际上由于铁心是由硅钢片迭成的，硅钢片上都有一层绝缘物(氧化膜或绝缘漆)，因此铁心的有效长度将小于实际长度 l，即需要打一个折扣数 K_c，K_c 叫做硅钢片的迭压系数，其值一般为 0.92～0.95，为计算方便，本书统一取 $K_c=0.93$，因此每一个齿实际铁心截面将等于 $0.93 b_t l$。

一个极距计算长度范围内的齿数$=\frac{z_1}{2p}\alpha_\delta$，因此一个极距计算长度范围内齿部铁心总截面 $S_t=0.93 b_t l \frac{z_1}{2p}\alpha_\delta$。根据每极磁通量

$$\phi=\tau' l B_{m\delta}=\alpha_\delta \tau l B_{m\delta},$$

于是可得齿部磁密计算公式如下：

$$B_{mt}=\frac{\phi}{S_t}=\frac{\alpha_\delta \tau l B_{m\delta}}{0.93 b_t l \frac{z_1}{2p}\alpha_\delta}=\frac{\frac{\pi D}{2p}B_{m\delta}}{0.93 b_t \frac{z_1}{2p}}$$

$$=\frac{\frac{\pi D}{z_1}B_{m\delta}}{0.93 b_t}=\frac{B_{m\delta}t}{0.93 b_t} \qquad (6\text{-}7)$$

(3) 轭部磁通密度 B_{mc}

仔细观察图 6-4 可看出，穿过气隙的磁通进入铁心轭部时，将分成两路，各成封闭回路。因此每个极距内穿过轭部的磁通，只有气隙每极磁通量 ϕ 的一半，即：

$$\phi_c=\frac{\phi}{2}=\frac{0.7\tau l B_{m\delta}}{2}$$

磁通 ϕ_c 穿过的轭部面积 $S_c=h_cK_cl=0.93h_cl$

因此轭部磁通密度计算公式为：

$$B_{mc}=\frac{\phi_c}{S_c}=\frac{0.7\tau lB_{m\delta}}{2\times0.93h_cl}=\frac{0.37\tau B_{m\delta}}{h_c} \tag{6-8}$$

气隙、齿部、轭部磁密的一般数值可参考表 6-1。早年出厂的杂牌异步电动机各部分磁密往往较低，可取表中小值。定子铁心如果质量较差或者冲片迭压不齐，压装不紧，也应选用小值。

电动机各部磁通密度的一般数值　　表 6-1

各部分磁密		一般数值（高斯）
气隙磁密	$B_{m\delta}$	5000～7500
齿部磁密	B_{mt}	13000～17500
轭部磁密	B_{mc}	10000～15500

前已指出，磁饱和只发生在铁心部分，因此三个磁密数据中主要应注意的是齿部和轭部两个磁密。有时会碰到，一只电动机气隙磁密很高，但铁心部分磁密却仍在允许范围内，这种情况应该看作是正常的，不会产生很大的空载电流。

4．槽满率（S_f）的计算

槽满率是指槽内绝缘导线所占面积与槽有效面积之比；槽有效面积是指除去槽楔后槽的净面积与槽内绝缘所占面积之差：

槽有效面积＝槽净面积
　－槽内绝缘所占面积

对于圆底槽（见图 6-7），除去槽楔后的净面积可按下式计算：

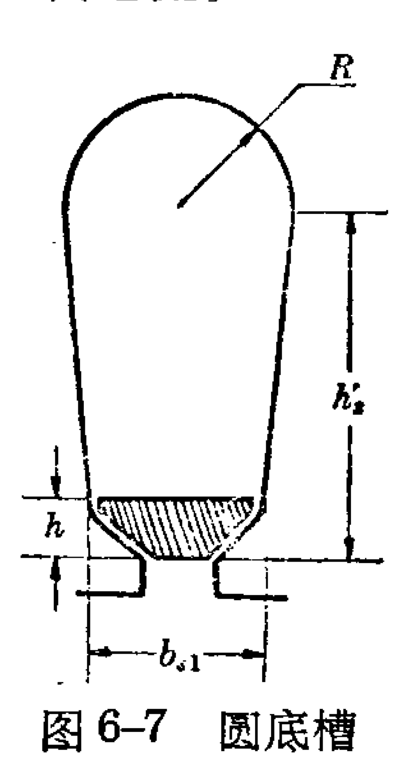


图 6-7　圆底槽

$$槽净面积=\frac{2R+b_{s1}}{2}(h_s'-h)+\frac{\pi R^2}{2}$$

式中第一项为梯形面积，第二项为底部半圆面积。

平底槽净面积按下式计算：

$$槽净面积=\frac{b_{s2}+b_{s1}}{2}(h_s'-h)$$

式中 b_{s2} 为底边长度。

槽内绝缘所占面积等于所用绝缘材料的厚度乘以长度。

单根导体(圆铜线)的截面积$=\frac{\pi d^2}{4}$，其中 d 为包括绝缘在内的导体外径。每槽共有导体 S_n 根，因此槽内绝缘导体所占面积为 $NS_n\frac{\pi d^2}{4}$，槽满率

$$S_f=\frac{NS_nd^2\cdot\frac{\pi}{4}}{槽有效面积} \tag{6-9}$$

根据嵌线经验，槽满率数值一般应小于0.8，否则嵌线就有困难。常用数值在0.65～0.75之间，小于0.65时铁心利用率就差，具体数值可以根据嵌线技术决定，嵌线技术高的可取高些。

5. 改绕计算方法

(1) 磁密计算方法

磁密计算有两种方法，一是取定匝数，算出磁密，二是取定磁密，倒算匝数。无论哪种方法，关键都在于算出每相串联匝数 w 应取多大，才能既不使铁心齿、轭部过分饱和，又能较充分地利用铁心材料。从(6-6)、(6-7)、(6-8)式中可看到，每相串联匝数 w 确定后，气隙磁密即确定，随之铁心齿、轭部磁密也就确定。计算方法如下：

1）取定匝数，算出磁密：如果改绕后的多速电动机，其中有一个极数与原单速电动机极数相同，可以采用先定匝数再算磁密的方法来计算。

一开始匝数究竟取多少，可以从保证多速电动机在这一极数下各部分磁密与原单速电动机相同的原则出发来初步估算。

我们以带“′”符号表示原单速电动机数据，不带“′”为改绕后同极数时多速电动机数据，根据(6-6)式，

$$B'_{m\delta}=\frac{K'_E U'\cdot 10^8}{1.55\,w' K'_{dy}\tau' l'},\qquad B_{m\delta}=\frac{K_E U\cdot 10^8}{1.55\,w K_{dy}\tau\cdot l}$$

$$\because\quad B_{m\delta}=B'_{m\delta},\quad \tau'=\tau,\quad K'_E=K_E$$

$$\therefore\quad \frac{U'}{K'_{dy}w'}=\frac{U}{K_{dy}w}$$

得

$$\frac{w}{w'}=\frac{UK'_{dy}}{U'K_{dy}}$$

实际计算时一开始取定每相串联匝数 w 不大方便，而取定每槽导体数 S_n 比较方便。根据(6-3)式，

$$w'=\frac{S'_n z_1}{2ma'}\qquad w=\frac{S_n z_1}{2ma}$$

$$\therefore\quad \frac{w}{w'}=\frac{S_n a'}{S'_n a}$$

代入前式得

$$S_n=\frac{UK'_{dy}a}{U'K_{dy}a'}\,S'_n \tag{6-10}$$

多速电动机绕组方案及接法如已确定，K_{dy}、U、a 就已知，于是根据(6-10)式就可初步估算出改绕后多速电动机所需的每槽导体数。

S_n 值初定之后，应根据此值算出相应的每相串联匝数 w 值。用(6-6)、(6-7)、(6-8)式算出各极数时的气隙、齿部和轭部磁密数值。如算出的磁密值不合适，还应根据计算结果对 S_n 值作适当修正。如此反复计算，直至各极数下各部分磁密合适为止。

2）取定磁密，倒算匝数：用取定匝数(或每槽导体数)算出磁密的方法作改绕计算，缺点是：如果遇到改绕后多速电动机极数和原电动机极数都不相同以及空铁心重绕等情况，匝数的初步估算就有一定困难，反复次数也可能较多。因此有时可采用先取定磁密，再倒算出每相串联匝数和每槽导体数的方法。

欲取定磁密，必须先估计一下改后多速电动机哪一个极数时的哪一部分磁密可能最高。取定这个最高的磁密数值并限制在允许范围内(这样作，可以避免铁心严重饱和)，即可根据此磁密数值算出其余几个极数时各部分的磁密数值以及所需的每相串联匝数和每槽导体数。

估计改后多速电动机哪一个极数下哪一部分磁密可能最高，可以利用下式：

$$\frac{B_{mtII}}{B_{mtI}}=\frac{B_{m\delta II}}{B_{m\delta I}}=\frac{p_{II}E_{II}w_I K_{dyI}}{p_I E_I w_{II} K_{dyII}}$$

$$\frac{B_{mcI}}{B_{mcII}}=\frac{p_{II}B_{m\delta I}}{p_I B_{m\delta II}}$$

上面第一个式中未考虑由于极数不同引起压降系数值不同所造成的影响，但作近似估算时这个影响是不大的。

一般情况下，极数多时，由于极距减小，齿部磁密相对较高，容易饱和，可作为取定对象；极数少时，由于极距增大，轭部磁密相对较高，可作为取定对象。

(2) 线径计算方法

每槽导体数确定之后，就可以确定所用导线线径。这里的关键在于取定槽满率。

通常，改绕后多速电动机槽满率可取与原单速电动机相等。这样，就可以利用原单速电动机导线线径直接估算出改后多速电动机需用的线径。

我们仍以带“′”表示原单速电动机数据，不带“′”表示改绕后多速电动机数据。

原单速电动机槽内导体总截面(包括导线绝缘层在内)

$$=N'S'_n d'^2\frac{\pi}{4}$$

改绕后多速电动机槽内导体总截面(包括导线绝缘层在内)$=NS_n d^2\dfrac{\pi}{4}$

由于两者槽满率相等，因此

$$N'S'_n d'^2=NS_n d^2$$

于是得：

$$d^2=\frac{N'S'_n}{NS_n}d'^2$$

改绕后多速电动机线径(包括导线绝缘层在内)

$$d=\sqrt{\frac{N'S'_n}{NS_n}}d' \qquad (6\text{-}11)$$

早年出厂的杂牌异步电动机槽满率往往较低，改绕时可适当提高以充分利用铁心而提高电动机出力。这时改绕后多速电动机线径就要在取定槽满率之后按照槽满率计算公式算出(空铁心绕制也同样)。

目前中小型电动机导线一般都用 QZ 型高强度聚脂漆包圆铜线，有时也用到 QQ 型高强度聚乙烯醇缩醛漆包圆铜线，

线规及绝缘厚度列于本书附录二。

(3) 功率估算方法

异步电动机的功率决定于它的额定电压、额定电流、功率因数以及效率,因此要正确地估算改绕后电动机的功率,必须知道改后电动机各极数下的功率因数和效率。但是在一般使用条件下,要测定各极数下的功率因数和效率是有困难的,所以通常可用额定电流的估算来代替功率的估算。这对一般工厂也可以满足使用要求。

要估出电动机的额定电流就必须决定电动机的电流密度。通常,如果改绕前后电动机的使用条件不变,则同极数下的电流密度可取得与原电机相等;如果改绕后使用条件有改善,例如通风条件变好,满载工作时间缩短等,则同极数下电流密度可酌情提高。多极数时由于转速降低,通风条件变差,电流密度应适当降低。

早年出厂的杂牌异步电动机,定子电流密度往往较低,改绕后根据情况也可适当提高以增大出力。

决定了电流密度以后,就可根据所用导线截面算出每相绕组一个支路的额定电流,再按照绕组接法及并联路数算出电动机的额定电流。

本章下节改绕举例中多极数通风条件差的影响未予考虑,估算电流时不同极数下是按同一电流密度计算的,因此多极数时实际额定电流应小于计算值,具体数值可在试运转时观察电动机的温升来决定。此点在参考下文实例时应特别注意。

第三节 改绕实例

【例一】 一只 JO94-6 异步电动机,改绕 6/8 极双速。

1. 原数据

功率	100 马力
额定电压	380/220 伏
接法	2Y/2△
额定电流	125/215 安
极数	6
定子槽数	54
转子槽数	68
定子内径	375 毫米
铁心长度	305 毫米
定子齿宽	11 毫米
定子轭高	32 毫米
每槽导体数	8
导线(裸)线径	1.85 毫米 (QZ 型)
并绕根数	5
跨距	1—9

2. 确定 6/8 极单绕组方案及接法

根据定子槽数可知 8 极时将出现分数槽绕组。为了判断能否得出对称绕组，先求 p 与 z_1 之间的最大公约数 t，因 $p=4$，$z_1=54$，所以，$t=2$，根据 $\frac{z_1}{tm}=\frac{54}{2\times3}=9$，可知 8 极能得出对称绕组。考虑到改绕后电动机系用作空调鼓风，6 极时要求出力高，决定选用第九章中方案 19，该方案 6 极为正规 60° 相带绕组，反向法得 8 极；跨距 $y=6$，$K_{dy6}=0.83$，$K_{dy8}=0.61$。

根据鼓风机特点，决定 6/8 极接法采用 2Y/Y，此时 $\frac{M_8}{M_6}\approx0.67$，$\frac{P_8}{P_6}\approx0.5$。

3. 原电动机有关数据计算

(1) 基本数据

1) 极距

$$\tau' = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3.14\times 375}{6} = 196.25 \text{ 毫米}$$

2) 齿距

$$t = \frac{\pi D}{z_1} = \frac{3.14\times 375}{54} = 21.8 \text{ 毫米}$$

3) 每相串联匝数

$$w' = \frac{S'_n z_1}{2ma} = \frac{8\times 54}{2\times 3\times 2} = 36 \text{ 匝}$$

4) 分布系数、短距系数、绕组系数

因

$$q = \frac{z_1}{2pm} = \frac{54}{6\times 3} = 3,$$

$$\alpha = \frac{2p\cdot 180^\circ}{z_1} = \frac{6\times 180^\circ}{54} = 20^\circ$$

求得

$$K'_d = \frac{\sin\dfrac{q\alpha}{2}}{q\sin\dfrac{\alpha}{2}} = \frac{\sin\dfrac{3\times 20^\circ}{2}}{3\sin\dfrac{20^\circ}{2}} = \frac{\sin 30^\circ}{3\sin 10^\circ} = 0.96$$

$$K'_y = \cos\frac{20^\circ}{2} = \cos 10^\circ = 0.985 \text{ (短一槽)}$$

$$K'_{dy} = K'_d K'_y = 0.96\times 0.985 = 0.945$$

(2) 各部分磁密

1) 气隙磁密

该电动机功率较大，压降系数取上限值 $K'_E = 0.97$，求得

$$B'_{m\delta} = \frac{0.97U\cdot 10^8}{1.55w'K'_{dy}\tau' l}$$

$$= \frac{0.97\times 220\times 10^8}{1.55\times 36\times 0.945\times 196.25\times 305} = 6750 \text{ 高斯}$$

2）齿部磁密

$$B_{mt}=\frac{B'_{m\delta}t}{0.93b_t}=\frac{6750\times21.8}{0.93\times11}=14384\text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B'_{mc}=\frac{0.37\tau'B_{m\delta}}{h_c}=\frac{0.37\times196.25\times6750}{32}=15320\text{ 高斯}$$

4．改绕计算

(1) 极距计算

$$\tau_6=\tau'=196.25\text{ 毫米}$$

$$\tau_8=\frac{3.14\times375}{8}=147\text{ 毫米}$$

(2) 各部分磁密计算

由于改后电动机6极与原电动机极数相同，故采用取定匝数算磁密的方法来计算。

先根据(6-10)式初估改绕后电动机每槽导体数 S_n:

$$S_n=\frac{UK'_{dy}a}{U'K_{dy}a'}S'_n=1\times\frac{0.945}{0.83}\times1\times8=9.1$$

由(5-5)式得

$$\frac{B_{m\delta8}}{B_{m\delta6}}=\frac{4}{3}\times1\times\frac{1}{2}\times\frac{0.83}{0.61}=0.91$$

考虑到8极时极数增多，压降系数 K_E 将减小，故取

$$\frac{B_{m\delta8}}{B_{m\delta6}}=0.9。$$

每槽导体数 S_n 取整数，$S_n=9$。

此时6极和8极每相串联匝数为：

$$w_6=\frac{9\times54}{2\times3\times2}=40.5,$$

$$w_8=2w_6=81$$

1）气隙磁密

$$B_{m\delta 6}=\frac{0.97\times 220\times 10^{8}}{1.55\times 40.5\times 0.83\times 196.25\times 305}=6850 \text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta 8}=0.9B_{m\delta 6}=6165 \text{ 高斯}$$

2）齿部磁密

$$B_{mt6}=\frac{6850\times 21.8}{0.93\times 11}=14600 \text{ 高斯}$$

$$B_{mt8}=0.9B_{mt6}=13140 \text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B_{mc6}=\frac{0.37\times 196.25\times 6850}{32}=15540 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc8}=\frac{0.37\times 147\times 6165}{32}=10478 \text{ 高斯}$$

算出的各极数下各部分磁密基本合适，所以每槽导体数就取定为 9。采用双层绕组，一层 5 根，一层 4 根*。

(3) 线径计算

按(6-11)式估算改绕后需用线径(假定并绕根数相同)。

查附录二知，原电动机导线包括绝缘在内直径约 1.97 毫米，所以改绕后线径 d(包括绝缘在内)为：

$$d=\sqrt{\frac{8}{9}}\times 1.97=1.85 \text{ 毫米}$$

除去绝缘之外裸线线径应为 1.74 毫米。实际采用裸线线径为 1.68 毫米，并绕 6 根。槽满率比原单速电动机稍有提高。

(4) 功率估算

$$\text{原每根导线铜截面}=5\times\frac{3.14\times 1.85^{2}}{4}=13.43 \text{ 毫米}^{2}$$

---

* 由于每槽导体数为奇数，一半线圈匝数为 5，一半线圈匝数为 4，所以在 2Y 接法(6 极)时两条支路的线圈匝数安排，应尽量注意平衡。

2Y 接法时原定子绕组每路电流 $=\frac{125}{2}=62.5$ 安

原单速电动机电流密度

$$\Delta'=\frac{62.5}{13.43}=4.65\text{ 安/毫米}^2$$

$$\text{改绕后每根导线铜截面}=6\times\frac{3.14\times1.68^2}{4}=13.3\text{ 毫米}^2$$

按原电动机电流密度计算的改后电动机每路电流 $=13.3\times4.65=62$ 安

六极(2Y 接法)额定线电流 $=2\times62$ 安 $=124$ 安

八极(Y 接法)额定线电流 $=62$ 安

由此看出六极时功率与原单速电动机相同；八极时功率约为六极的一半。

5. 运转试验

起动良好；转速、温升正常；三相电流对称，六极空载电流 46 安，八极空载电流 30 安。

【例二】 一只 JO_2-22-4 异步电动机，改绕 2/4 极双速。

1. 原数据

功率	1.5 千瓦
额定电压	380/220 伏
接法	Y/△
额定电流	3.43/6.86 安
极数	4
定子槽数	24
转子槽数	18
定子内径	90 毫米
铁心长度	115 毫米

定子齿宽	6 毫米
定子轭高	12.5 毫米
每槽导体数	62
裸线线径	0.8 毫米(QZ 型)
并绕根数	1
跨距	1—6

2. 确定 2/4 极单绕组方案及接法

两极为正规 60° 相带绕组，用庶极接法反向得四极。此绕组方案即为本书第九章方案 1。为了使两个极数下绕组系数接近，跨距选择 $y=7$，此时 $K_{dy2}=0.76$，$K_{dy4}=0.80$。

根据使用场合变速要求，决定采用具有接近恒功率的可变转矩性能的 2Y(2 极)/△(4 极)接法。

3. 原电动机有关数据计算

(1) 基本数据

1) 极距

$$\tau'=\frac{3.14\times90}{4}=70.6\text{ 毫米}$$

2) 齿距

$$t=\frac{3.14\times90}{24}=11.76\text{ 毫米}$$

3) 每相串联匝数

$$w'=\frac{62\times24}{2\times3\times1}=248\text{ 匝}$$

4) 分布系数、短距系数、绕组系数

根据 $$q=\frac{24}{4\times3}=2;$$

$$\alpha=\frac{4\times180^\circ}{24}=30^\circ$$

求得
$$K'_d=\frac{\sin 30°}{2\sin 15°}=0.965$$

$$K'_y=\cos\frac{30°}{2}=0.966\ (\text{短一槽})$$

$$K'_{dy}=0.965\times0.966=0.93$$

(2) 各部分磁密

1) 气隙磁密

该电动机为小型电动机，取压降系数 $K_E=0.90$,

$$B'_{m\delta}=\frac{0.90\times220\times10^8}{1.55\times248\times0.93\times70.6\times115}=6820\ \text{高斯}$$

2) 齿部磁密

$$B'_{mt}=\frac{6820\times11.76}{0.93\times6}=14370\ \text{高斯}$$

3) 轭部磁密

$$B'_{mc}=\frac{0.37\times70.6\times6820}{12.5}=14250\ \text{高斯}$$

4. 改绕计算

(1) 极距

$$\tau_2=\frac{3.14\times90}{2}=141.2\ \text{毫米}$$

$$\tau_4=\tau'=70.6\ \text{毫米}$$

(2) 各部分磁密

按(6-10)式初估每槽导体数

$$S_n=\sqrt{3}\times\frac{0.93}{0.80}\times1\times62=125$$

$$\frac{B_{m\delta4}}{B_{m\delta2}}=2\times\sqrt{3}\times\frac{1}{2}\times\frac{0.76}{0.80}=1.64$$

由于四极压降系数小于两极，故两个极数下的磁密比值应稍小，取 $\frac{B_{m\delta4}}{B_{m\delta2}}=1.62$。

考虑到两极时铁心轭部磁密可能较高，实取 $S_n=128$，比初估值略为增大。

此时四极和两极每相串联匝数为

$$w_4=\frac{128\times 24}{2\times 3}=512 \text{ 匝}$$

$$w_2=\frac{w_4}{2}=256 \text{ 匝}$$

1）气隙磁密

$$B_{m\delta 4}=\frac{0.9\times 380\times 10}{1.55\times 512\times 0.80\times 70.6\times 115}=6633 \text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta 2}=\frac{B_{m\delta 4}}{1.62}=4094 \text{ 高斯}$$

2）齿部磁密

$$B_{mt4}=\frac{6633\times 11.76}{0.93\times 6}=14000 \text{ 高斯}$$

$$B_{mt2}=\frac{B_{mt4}}{1.62}=8642 \text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B_{mc4}=\frac{0.37\times 70.6\times 6633}{12.5}=13860 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc2}=\frac{0.37\times 141.2\times 4094}{12.5}=17100 \text{ 高斯}$$

根据计算，各部磁密在容许范围内，故取定的 S_n 值可用；因是双层绕组，每只线圈匝数等于 $\frac{S_n}{2}=64$ 匝。

(3) 线径计算

按(6-11)式估算包括绝缘在内的线径：

$$d=\sqrt{\frac{62}{128}}\times 0.89=0.62 \text{ 毫米}$$

查附录二线规表，取裸线线径为 0.55 毫米。

(4) 功率估算

$$原导线铜截面=\frac{3.14\times0.8^2}{4}=0.5\ 毫米^2$$

Y 接法时原定子绕组每路电流=3.43 安

$$原电流密度=\frac{3.43}{0.5}=6.86\ 安/毫米^2$$

$$改绕后导线铜截面=\frac{3.14\times0.55^2}{4}=0.238\ 毫米^2$$

按同一电流密度改绕后每路电流=0.238×6.86

=1.63 安

四极(△ 接法)额定电流=$\sqrt{3}\times1.63=2.82$ 安

两极(2Y 接法)额定电流=2×1.63=3.26 安

由此约略估计改绕后四极功率约为原电动机功率的80%左右,两极时功率接近原电动机功率。

5. 运转试验

起动情况、转速、温升均正常;三相电流对称,四极空载电流 1.5 安,两极空载电流 1 安。

【例三】 一只 4 极微型异步电动机,改绕 4/8 极双速

1. 原数据

功率	250 瓦
额定电压	380 伏
接法	Y
额定电流	0.69 安
极数	4
定子槽数	24
定子内径	72 毫米
铁心长度	63 毫米
定子齿宽	4.5 毫米

定子轭高	6 毫米
每槽导体数	185(单层)
裸线线径	0.47 毫米
并绕根数	1
跨距	1—6

2. 确定 4/8 极单绕组方案及接法

四极为正规 60° 相带绕组，庶极接法得八极；两种极数时的槽矢量图如图 6-8，绕组接线图如图 6-9，绕组排列表如下：

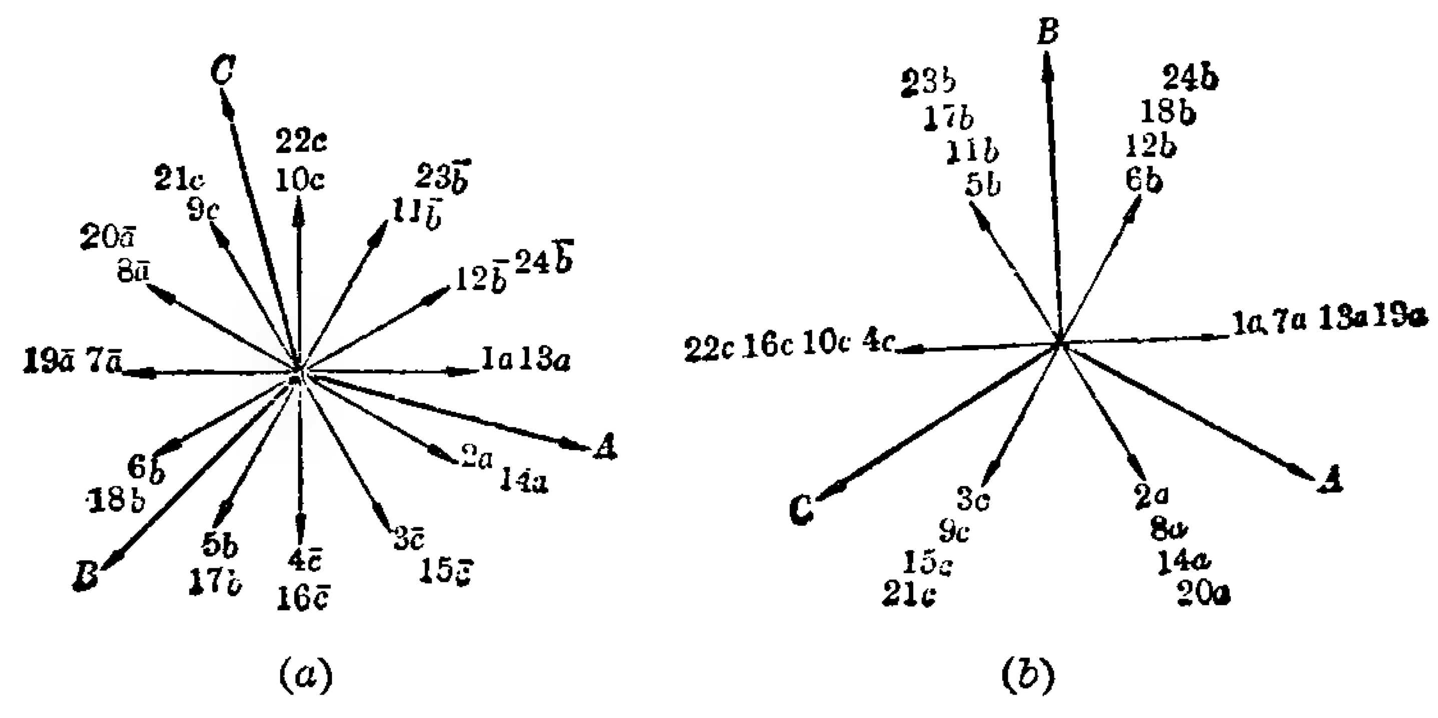


图 6-8 例三 4/8 极 24 槽双速电动机槽矢量
(a) 四极；(b) 八极

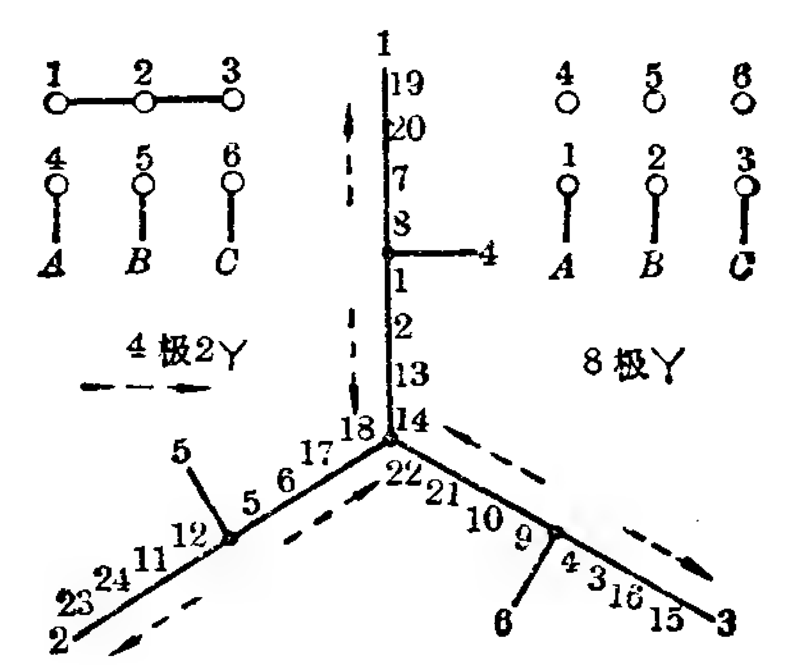


图 6-9 例三 4/8 极 24 槽双速电动机接线图

4/8 极(定子 24 槽)

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4 极	a	a	$-c$	$-c$	b	b	$-a$	$-a$	c	c	$-b$	$-b$
8 极	a	a	c	c	b	b	a	a	c	c	b	b
反向指示			*	*			*	*			*	*
槽　号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
4 极	a	a	$-c$	$-c$	b	b	$-a$	$-a$	c	c	$-b$	$-b$
8 极	a	a	c	c	b	b	a	a	c	c	b	b
反向指示			*	*			*	*			*	*

选择跨距 $y=4$。算得绕组系数分别是：$K_{dy4}=0.84$，$K_{dy8}=0.75$。

根据使用场合变速要求，选择具有恒转矩性能的 2Y (4 极)/Y(8 极)接法。

3. 原电动机有关数据计算

(1) 基本数据

求得极距 τ'、齿距 t、每相串联匝数 w'、绕组系数 K'_{dy} 如下：

$$\tau'=56.5 \text{ 毫米}, \qquad t=9.42 \text{ 毫米}$$

$$w'=740 \text{ 匝} \qquad K'_{dy}=0.93$$

(2) 各部分磁密

1) 气隙磁密

该电动机属 600 瓦以下的微型电机，取压降系数 $K_E=0.86$

$$B'_{m\delta}=\frac{0.86\times220\times10^8}{1.55\times740\times0.93\times56.5\times63}=4980 \text{ 高斯}$$

2) 齿部磁密

$$B'_{mt}=\frac{4980\times9.42}{0.93\times4.5}=11210\text{ 高斯}$$

3) 轭部磁密

$$B'_{mc}=\frac{0.37\times56.5\times4980}{6}=17350\text{ 高斯}$$

4. 改绕计算

(1) 极距计算

$$\tau_4=\tau'=56.5\text{ 毫米}\qquad \tau_8=\frac{\tau_4}{2}=28.25\text{ 毫米}$$

(2) 各部分磁密计算

按(6-10)式初估每槽导体数

$$S_n=1\times\frac{0.93}{0.84}\times\frac{2}{1}\times185=409$$

由(5-5)式得

$$\frac{B_{m\delta8}}{B_{m\delta4}}=\frac{4}{2}\times\frac{1}{1}\times\frac{1}{2}\times\frac{0.84}{0.75}=1.12$$

由于八极压降系数降低，两种极数下磁密比值取为1.1。

初步选取 $S_n=408$ 匝。四极和八极每相串联匝数为：

$$w_4=\frac{24\times408}{2\times3\times2}=816\text{ 匝},\qquad w_8=2w_4=1632\text{ 匝}$$

1) 气隙磁密

$$B_{m\delta4}=\frac{0.86\times220\times10^8}{1.55\times816\times0.84\times56.5\times63}=5000\text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta8}=5000\times1.1=5500\text{ 高斯}$$

2) 齿部磁密

$$B_{mt4}=\frac{5000\times9.42}{0.93\times4.5}=11250\text{ 高斯}$$

$$B_{mt8}=11250\times1.1=12375 \text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B_{mc4}=\frac{0.37\times56.5\times5000}{6}=17420 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc8}=\frac{0.37\times28.25\times5500}{6}=9600 \text{ 高斯}$$

算得各部分磁密基本合适，于是 S_n 取定为 408 匝，每只线圈匝数为 204 匝。

(3) 线径计算

按(6-11)式估算包括绝缘在内的线径：

$$d=\sqrt{\frac{185}{408}}\times0.53=0.36 \text{ 毫米}$$

实取裸线线径为 0.33 毫米。

(4) 功率估算

$$\text{原导线截面}=\frac{3.14\times0.47^2}{4}=0.1734 \text{ 毫米}^2$$

$$\text{原电流密度}=\frac{0.69}{0.1734}=4 \text{ 安/毫米}^2$$

$$\text{改绕后导线截面}=\frac{3.14\times0.33^2}{4}=0.0855 \text{ 毫米}^2$$

按同一电流密度，改绕后每路电流 $=0.0855\times4=0.34$ 安

四极(2Y 接法)额定电流 $=2\times0.34=0.68$ 安

八极(Y 接法)额定电流 $=0.34$ 安

由此看出，改绕后四极功率基本保持原功率，八极功率接近四极的一半。

(5) 运转试验

试验结果正常。

【例四】 一只早年生产的杂牌八极异步电动机，改绕 6/8 极双速

1. 原数据

功率	24 马力
额定电压	350 伏
接法	2△
额定电流	40 安
极数	8
定子槽数	72
转子槽数	96
定子内径	372 毫米
铁心长度	163 毫米 (径向通风道宽 9 毫米已除去)
定子齿宽	6.7 毫米
定子轭高	39.2 毫米
每槽导体数	36(双层)
裸线线径	1.62, 1.30 毫米(单纱漆包)
并绕根数	2
跨距	1—9

2. 确定 6/8 极单绕组方案及接法

该电动机系用作空调鼓风，要求六极时出力较八极高。试排绕组时若六极排成 60° 相带绕组，反向得八极将严重不对称。若八极排成 60° 相带绕组，反向得六极虽可得对称绕组(第九章方案 20)，但六极分布系数低，不能满意。故决定选用第九章方案 21。该方案八极为正规 120° 相带绕组，反向得六极不对称绕组，用分裂线圈法使六极得到对称；两个极数下分布系数分别为 $K_{d8}=0.831$, $K_{d6}=0.77$，跨距采用 1—9，绕组系数为 $K_{dy6}=0.67$, $K_{dy8}=0.817$。方案 21 虽然六极时采用分裂线圈有所牺牲，但在提高六极性能方面较之方案 20

仍较满意。

绕组接法采用2Y(6极)/△(8极)。

3. 原电动机有关数据计算

(1) 基本数据

$$\tau' = 146 \text{毫米} \qquad t = 16.2 \text{毫米}$$

$$w' = 216 \text{匝} \qquad K'_{dy} = 0.945$$

(2) 各部分磁密

1) 气隙磁密

取压降系数 $K_E = 0.93$,

$$B'_{m\delta} = \frac{0.93 \times 350 \times 10^8}{1.55 \times 216 \times 0.945 \times 146 \times 163} = 4320 \text{高斯}$$

2) 齿部磁密

$$B'_{mt} = \frac{4320 \times 16.2}{0.93 \times 6.7} = 11230 \text{高斯}$$

3) 轭部磁密

$$B'_{mc} = \frac{0.37 \times 146 \times 4320}{39.2} = 5950 \text{高斯}$$

4. 改绕计算

(1) 极距计算

$$\tau_6 = \frac{3.14 \times 372}{6} = 195 \text{毫米} \qquad \tau_8 = \tau' = 146 \text{毫米}$$

(2) 各部分磁密计算

原电动机额定电压为350伏，实际用在380伏电网上工作也正常，温升很低。所以用(6-10)式初估每槽导体数时，原电机额定电压以380伏计算：

$$S_n = 1 \times \frac{0.945}{0.817} \times \frac{1}{2} \times 36 = 20.8$$

$$\frac{B_{m\delta 6}}{B_{m\delta 8}} = \frac{3}{4} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{2}{1} \times \frac{0.817}{0.67} = 1.06$$

由于六极压降系数比八极大，实际两种极数下磁密比值取为1.08。

考虑到原电动机有一定裕量，初步选取 $S_n=20$。每种极数下每相串联匝数为：

$$w_8=\frac{20\times72}{2\times3}=240\text{ 匝}\qquad w_6=\frac{w_8}{2}=120\text{ 匝}$$

1）气隙磁密

$$B_{m\delta8}=\frac{0.93\times380\times10^8}{1.55\times240\times0.817\times146\times163}=4890\text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta6}=1.08\times4890=5281\text{ 高斯}$$

2）齿部磁密

$$B_{mt8}=\frac{4890\times16.2}{0.93\times6.7}=12710\text{ 高斯}$$

$$B_{mt6}=1.08\times12710=13727\text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B_{mc8}=\frac{0.37\times146\times4890}{39.2}=6740\text{ 高斯}$$

$$B_{mc6}=\frac{0.37\times195\times5281}{39.2}=9721\text{ 高斯}$$

(3) 线径计算

按改绕后槽内裸铜线总截面积和原电动机相同原则出发计算，

原电动机每根导线铜截面积

$$=\frac{3.14\times1.62^2}{4}+\frac{3.14\times1.30^2}{4}$$

$$=2.06+1.327=3.39\text{ 毫米}^2$$

原电动机槽内裸铜线总截面积 $=36\times3.39=122$ 毫米²

改绕后每根导线截面积 $=\frac{122}{20}=6.1$ 毫米²

选用两股 1.68 毫米、一股 1.50 毫米 QZ 型高强度聚酯漆包线并绕。

并绕后每根导线截面积

$$=\frac{3.14\times1.68^2}{4}\times2+\frac{3.14\times1.50^2}{4}=6.2\text{ 毫米}^2$$

槽内裸铜线总截面积 $=20\times6.2=124$ 毫米^2

计算结果比原电动机槽内裸铜线总截面积略有提高；考虑到原电动机用的是单纱漆包线，绝缘层比 QZ 型厚，原电动机槽满率也不高，因此嵌下是没有问题的。

(4) 功率估算

原电动机每相电流 $=\frac{40}{\sqrt{3}}=23.1$ 安

原电动机电流密度 $=\frac{23.1}{2\times3.39}=3.41$ 安/毫米^2

按同一电流密度，改绕后每路电流

$$=3.41\times6.2=21.14\text{ 安}$$

六极(2Y 接法)额定电流 $=2\times21.14=42.28$ 安

八极(△ 接法)额定电流 $=\sqrt{3}\times21.14=36.6$ 安

由此看出，改绕后六极功率稍大于原电动机功率，八极功率约为原电动机功率的 80%。

实际上该电动机为开启式并具有径向通风，改绕后装置地点宽敞，通风条件较好。电流密度取 5.5 安/毫米^{2}也可以，按此计算分别得：

$$\text{六极额定电流}=2\times5.5\times6.2=68\text{ 安}$$

$$\text{八极额定电流}=\sqrt{3}\times5.5\times6.2=59\text{ 安}$$

5. 运转试验

起动、转速、温升均正常；各种极数下三相电流对称，八极空载电流约 14 安，六极空载电流约 18 安。

【例五】 一只早年生产的杂牌四极异步电动机，改绕6/8极双速。

1. 原数据

功率	3马力
额定电压	380/220伏
接法	Y/△
额定电流	4.6/7.82安
极数	4
定子槽数	36
转子槽数	45
定子内径	115毫米
铁心长度	96毫米
定子齿宽	4毫米
定子轭高	20毫米
每槽导体数	42(单层)
裸线线径	1.2毫米
并绕根数	1
跨距	1—10

2. 确定6/8极单绕组方案及接法

定子为36槽，八极时将出现分数槽绕组。按z_1和p的最大公约数$t=4$求得$\frac{z_1}{tm}=\frac{36}{4\times3}=3$，可知能得出对称绕组。

由于分数槽绕组磁势曲线较之整数槽绕组磁势曲线波形差，谐波多(参见第八章)，该电动机改绕后八极运转机会又较多，所以决定八极时采用正规60°相带绕组，反向得六极。此即第九章方案15。

根据使用场合负载不变的情况，决定选择具有接近恒转矩性能的2Y(6极)/△(8极)接法。

跨距采用1—7，这样两个极数时的绕组系数比较接近。绕组系数 $K_{dy6}=0.64$，$K_{dy8}=0.83$。

3. 原电动机有关数据计算

(1) 基本数据

$\tau'=90.27$ 毫米　　$t=10$ 毫米

$w'=252$ 匝　　$K'_{dy}=0.96$

(2) 各部分磁密

1) 气隙磁密

取压降系数 $K_E=0.9$，

$$B'_{m\delta}=\frac{0.9\times220\times10^8}{1.55\times252\times0.96\times90.27\times96}=6090 \text{ 高斯}$$

2) 齿部磁密

$$B'_{mt}=\frac{6090\times10}{0.93\times4}=16370 \text{ 高斯}$$

3) 轭部磁密

$$B'_{mc}=\frac{0.37\times90.27\times6090}{20}=10170 \text{ 高斯}$$

4. 改绕计算

(1) 极距计算

$$\tau_6=\frac{3.14\times115}{6}=60 \text{ 毫米}$$

$$\tau_8=\frac{3.14\times115}{8}=45 \text{ 毫米}$$

(2) 各部分磁密计算

由于改绕后极数和原电动机极数都不同，所以用取定磁密，倒算匝数的方法进行计算。先计算两个极数的磁密比：

$$\frac{B_{mt8}}{B_{mt6}}=\frac{B_{m\delta8}}{B_{m\delta6}}=\frac{4}{3}\times\sqrt{3}\times\frac{1}{2}\times\frac{0.64}{0.83}=0.887$$

考虑八极压降系数减小，两个极数的磁密比值取0.87。

$$\frac{B_{mc6}}{B_{mc8}}=\frac{4}{3}\times\frac{1}{0.87}=1.53$$

改绕后电动机极数增多，轭部磁通必较原电动机为低，齿部相对易饱和，因此由上式可预计六极齿部磁密将是最高的，作为取定对象，取定 $B_{mt6}=16000$ 高斯，并取六极压降系数为0.88，倒算：

$$B_{m\delta6}=\frac{0.93\times4\times16000}{10}=5950\text{ 高斯}$$

$$w_6=\frac{0.88\times220\times10^8}{1.55\times5950\times0.64\times60\times96}=570\text{ 匝}$$

$$S_n=\frac{570\times2\times3\times2}{36}=190$$

实取 $S_n=200$，相应的 $w_6=600$ 匝，各部分磁密分别是：

1）气隙磁密

$$B_{m\delta6}=\frac{0.88\times220\times10^8}{1.55\times600\times0.64\times60\times96}=5664\text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta8}=0.87\times5664=4928\text{ 高斯}$$

2）齿部磁密

$$B_{mt6}=\frac{5664\times10}{0.93\times4}=15230\text{ 高斯}$$

$$B_{mt8}=0.87\times15230=13250\text{ 高斯}$$

3）轭部磁密

$$B_{mc6}=\frac{0.37\times5664\times60}{20}=6300\text{ 高斯}$$

$$B_{mc8}=\frac{B_{mc6}}{1.53}=4117\text{ 高斯}$$

(3) 线径计算

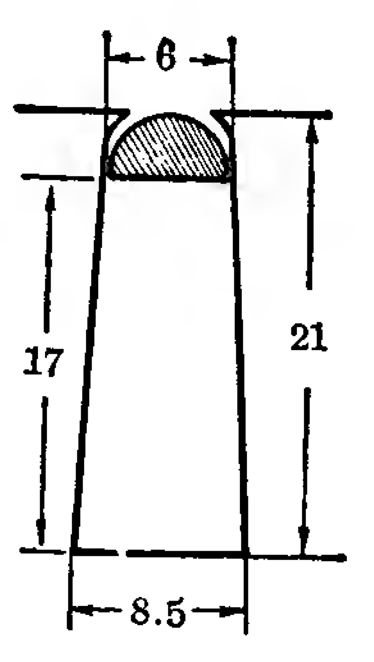


图 6-10 例五的定子槽形尺寸

该电动机槽形尺寸如图 6-10，除去槽楔后槽净面积

$$=\frac{6+8.5}{2}\times 17=123\ 毫米^2$$

原电动机槽绝缘占面积(单层绕组)

$$=(0.25+0.15)(42+8.5+6)$$

$$=0.4\times 56.5=22.6\ 毫米^2$$

原槽有效面积

$$=123-22.6\approx 100\ 毫米^2$$

查线规表 1.2 毫米线径圆铜线包括绝缘层在内 (QZ 型) 线径为 1.31 毫米，截面积为 1.348 毫米^2，则

原绝缘导线占面积 $=42\times 1.348=56.6$ 毫米^2

原电动机槽满率 $S'_f=\dfrac{56.6}{100}=0.566$

拆原绕组时觉得槽内导线较松，为了增大改绕后电动机出力，决定提高槽满率，取 $S_f=0.75$，同时考虑到改绕后采用双层绕组，增加了一层 0.25 毫米厚的薄膜青壳纸作层间绝缘。所以：

改绕后槽绝缘占面积 $=22.6+0.25\times 11=25.35$ 毫米^2

改绕后槽有效面积 $=123-25.35=97.65$ 毫米^2

改绕后绝缘导线占面积 $=0.75\times 97.65=73.24$ 毫米^2

改绕后每根导线(包括绝缘)截面积

$$=\frac{73.24}{200}=0.366\ 毫米^2$$

查线规表，选用 0.62 毫米线径 QZ 型漆包线，包括绝缘在内其截面积最大为 0.374 毫米^2，基本符合。

(4) 功率估算

原电动机铜线截面积$=\frac{3.14\times1.2^2}{4}=1.13$毫米^2

原电动机电流密度$=\frac{4.6}{1.13}=4.07$安/毫米^2

改绕后铜线截面积为 0.3 毫米^2

按同一电流密度，改绕后每路电流$=0.3\times4.07=1.22$安

六极(2Y 接法)额定电流$=2\times1.22=2.44$安

八极(△ 接法)额定电流$=\sqrt{3}\times1.22=2.11$安

实际上该电动机为开启式，使用场合通风良好，电流密度可提高，六极取 6 安/毫米^2，八极取 5.5 安/毫米^2，则：

六极额定电流$=2\times0.3\times6=3.6$安

八极额定电流$=\sqrt{3}\times0.3\times5.5=2.86$安

5．运转试验

起动、转速均正常；各极数下三相电流对称，六极空载电流 2.1 安，负载电流 3.2 安；八极空载电流 1.6 安，负载电流 3 安；长期运转温升正常。

【例六】 一只 4 极异步电动机空铁心，改绕 4/6 极双速

1．原数据

定子槽数	36
转子槽数	32
定子内径	118 毫米
铁心长度	125 毫米
定子齿宽	5.2 毫米
定子轭高	16 毫米

2．确定 4/6 极单绕组方案及接法

由于使用场合要求两个极数下为恒功率性能，故选用第九章中方案 13。该方案 4、6 两个极数下绕组系数较接近(跨

距 $y=6$)，$K_{dy4}=0.72$，$K_{dy6}=0.88$。

接法用 2Y(4 极)/△(6 极)，它具有接近恒功率的特性。

3. 改绕计算

(1) 极距计算

$$\tau_4=\frac{3.14\times118}{4}=92.7\text{ 毫米}$$

$$\tau_6=\frac{3.14\times118}{6}=62\text{ 毫米}$$

(2) 齿距计算

$$t=\frac{3.14\times118}{36}=10.3\text{ 毫米}$$

(3) 各部分磁密计算

空铁心无原数据作参考，用取定磁密倒算匝数方法来计算。

1) 气隙磁密比计算:

$$\frac{B_{m\delta6}}{B_{m\delta4}}=\frac{3}{2}\times\sqrt{3}\times\frac{1}{2}\times\frac{0.72}{0.88}=1.06$$

考虑到六极压降系数的减小，两个极数下磁密比值取 1.04。由两个极数下磁密比值可预见六极气隙磁密相对为高，故以六极齿部磁密作为取定对象。

2) 取 $B_{mt6}=16500$ 高斯，算得:

$$B_{m\delta6}=\frac{16500\times0.93\times5.2}{10.3}=7750\text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta4}=\frac{B_{m\delta6}}{1.04}=\frac{7750}{1.04}=7449\text{ 高斯}$$

$$B_{mt4}=\frac{B_{mt6}}{1.04}=\frac{16500}{1.04}=15866\text{ 高斯}$$

$$B_{mc6}=\frac{0.37\times62\times7750}{16}=11110\text{ 高斯}$$

$$B_{mc4}=\frac{0.37\times92.7\times7449}{16}=15967\text{ 高斯}$$

4 极压降系数取 0.90，则：

$$w_4=\frac{0.90\times220\times10^8}{1.55\times7449\times0.72\times92.7\times125}=206\text{ 匝}$$

$$S_n'=\frac{206\times2\times3\times2}{36}=68.7$$

3）考虑到该空铁心质量不够好，轭部又有缺角，磁密不能取高。故实取 $S_n=82$，此时

$$w_4=\frac{82\times36}{2\times3\times2}=246\text{ 匝},\quad w_6=2w_4=492\text{ 匝}$$

$$\because\quad \frac{206}{246}=0.8374,$$

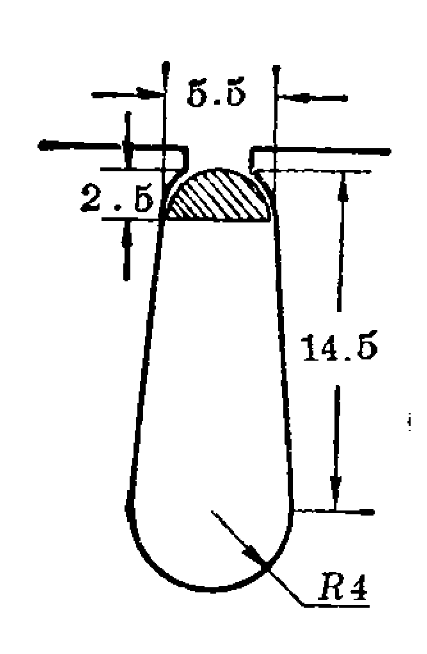


图 6-11　例六的定子槽形尺寸

∴　实际各部分磁密如下：

$B_{m\delta4}=0.8374\times7449=6238$ 高斯，

$B_{m\delta6}=6238\times1.04=6488$ 高斯

$B_{mt4}=0.8374\times15866=13286$ 高斯，

$B_{mt6}=13286\times1.04=13817$ 高斯

$B_{mc4}=0.8374\times15967=13370$ 高斯，

$B_{mc6}=11110\times0.8374=9304$ 高斯

（4）线径计算

该电动机槽形及尺寸如图 6-11。槽绝缘用一层 0.25 毫米厚薄膜青壳纸，一层 0.05 毫米厚聚酯薄膜；层间绝缘用一层 0.25 毫米厚薄膜青壳纸（纸宽估计 7 毫米）。

槽净面积

$$=\frac{8+5.5}{2}\times(14.5-2.5)+\frac{3.14\times4^2}{2}=106.1\text{ 毫米}^2$$

槽绝缘占面积

$=(0.25+0.05)\times(2\times14.5+3.14\times4+5.5)$

$+0.25\times7=15.85$ 毫米^2

槽有效面积$=106.1-15.85=90.25$ 毫米^2

取槽满率 $S_f=0.65$，则：

绝缘导线占面积$=0.65\times90.25=58.66$ 毫米^2

$$每根绝缘导线截面积=\frac{58.66}{82}=0.715 毫米^2$$

$$每根绝缘导线线径=\sqrt{\frac{4\times0.715}{3.14}}=0.954 毫米$$

查线规表得铜线线径为 0.86 毫米。

(5) 功率估算

该电动机为外吹风冷封闭式，电流密度取 5 安/毫米^2，现用

$$铜线截面积=\frac{3.14\times0.86^2}{4}=0.58 毫米^2$$

每路电流$=0.58\times5=2.9$ 安

四极（2Y 接法）额定电流$=2\times2.9$ 安$=5.8$ 安

六极（△ 接法）额定电流$=\sqrt{3}\times2.9$ 安$=5$ 安

4．运转试验

起动、转速均正常；三相电流对称，四极空载电流 2.7 安，六极空载电流 3.2 安；负载工作时四极电流 5.6 安，六极电流 4.8 安；长期运转温升正常。

【例七】 例四杂牌八极异步电动机改绕 4/6/8 极三速。

1．原电动机铭牌及各项数据（见例四）

4 极极距 $\tau_4=2\times\tau_8=2\times146=292$ 毫米。

2．绕组方案（采用第九章方案 27）

各个极数下绕组系数分别为

$$K_{dy4}=0.823,\ K_{dy6}=0.636,\ K_{dy8}=0.72$$

改后电动机用于空调鼓风，极数少时要求出力高，故接法采用 2△(4 极)/2△(6 极)/2Y(8 极)。

3. 改绕计算

(1) 各部分磁密计算

用取定磁密倒算匝数的方法进行计算。为此先估算一下各个极数下磁密比值，各极压降系数分别取 $K_{E4}=0.96$, $K_{E6}=0.95$, $K_{E8}=0.93$,

$$\frac{B_{mt8}}{B_{mt4}}=\frac{B_{m\delta 8}}{B_{m\delta 4}}=\frac{2\times 1\times 1\times 0.823\times 0.93}{1\times\sqrt{3}\times 1\times 0.72\times 0.96}=1.28$$

$$\frac{B_{mt6}}{B_{mt4}}=\frac{B_{m\delta 6}}{B_{m\delta 4}}=\frac{3\times 1\times 1\times 0.823\times 0.95}{2\times 1\times 1\times 0.636\times 0.96}=1.92$$

该电动机改绕系提高转速，极数少时铁心轭部磁密将增大。但该电动机轭部较厚，原轭磁密较低，所以极数减少时轭磁密问题不大。由以上各个极数下磁密比值看来，六极时齿部磁密将是最高的，故作为取定对象。取六极齿磁密 $B_{mt6}=15500$ 高斯，则：

$$B_{m\delta 6}=\frac{15500\times 0.93\times 6.7}{16.2}=5960\ 高斯$$

$$B_{mc6}=\frac{0.37\times 195\times 5960}{39.2}=10950\ 高斯$$

$$B_{m\delta 4}=\frac{5960}{1.92}=3100\ 高斯$$

$$B_{mt4}=\frac{15500}{1.92}=8100\ 高斯$$

$$B_{mc4}=\frac{0.37\times 292\times 3100}{39.2}=8550\ 高斯$$

$$B_{m\delta 8}=3100\times 1.28=3970 \text{ 高斯}$$

$$B_{mt8}=8100\times 1.28=10350 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc8}=\frac{0.37\times 146\times 3970}{39.2}=5470 \text{ 高斯}$$

按以上磁密数据，以4极为准倒算出匝数 w_4。

$$w_4=\frac{0.96\times 380\times 10^8}{1.55\times 163\times 292\times 3100\times 0.823}=194 \text{ 匝}$$

$$S_n=\frac{194\times 2\times 3\times 2}{72}=32.3$$

实取 $S_n=34$，各个极数下各部分磁密稍有降低，分别是：

$$B_{m\delta 4}=\frac{32}{34}\times 3100=2920 \text{ 高斯，}$$

$$B_{mt4}=7620 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc4}=8050 \text{ 高斯}$$

$$B_{m\delta 6}=5600 \text{ 高斯，}$$

$$B_{mt6}=14600 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc6}=10300 \text{ 高斯，}$$

$$B_{m\delta 8}=3740 \text{ 高斯，}$$

$$B_{mt8}=9730 \text{ 高斯}$$

$$B_{mc8}=5150 \text{ 高斯。}$$

(2) 线径计算

例四中已计算过原电动机槽内裸铜线总截面积为122毫米^2。每根导线是由$\phi 1.62$和$\phi 1.30$毫米的单纱漆包线双股并成。现每根导线取两股裸铜线径1.68毫米的QZ型高强度聚脂漆包圆铜线并成。每根导线铜截面$=2\times 2.217$毫米$^2=4.434$毫米^2，槽内裸铜线总截面积$=34\times 4.434=150.7$毫米^2。

由于QZ型漆包线绝缘层厚度比单纱漆包线大为减小，

所以槽内总铜截面虽有增加但嵌时仍不费力。

(3) 功率估算

原电动机电流密度为 3.41 安/毫米^2。

按同一电流密度，改绕后每路电流

$$=3.41\times4.434=15.1\text{ 安}$$

四、六极额定电流$=2\times15.1\times1.732=52.5$ 安

八极额定电流$=2\times15.1=30.2$ 安

该电动机改后装置地点宽敞，通风较好。电流密度取 5.5 安/毫米^{2}也不会温升过高。按此估算则：

四、六极额定电流$=2\times5.5\times4.434\times1.732=84.5$ 安

八极额定电流$=2\times5.5\times4.434=48.8$ 安

4. 运转试验

起动、转速、温升均正常；四极空载电流 5.5 安，六极空载电流 26 安，八极空载电流 8 安。

第七章　单绕组多速电动机的控制

一只单速异步电动机改绕成了单绕组多速异步电动机，要投入实际使用还必须解决“控制”问题。

单绕组多速电动机的控制可以用按钮、接触器、继电器等组合控制，也可以用万能转换开关以及其他特殊组合开关控制。本章即根据常用的绕组接线方法介绍几种控制电路，这些电路只是实现了单绕组多速电动机变换极数时对接线的要求，进一步的装置例如延时装置，极数自动变换等，读者可参考有关材料自行解决。

第一节　双速电动机的控制

1. 2Y/△ 接线方法的控制

2Y/△ 接线方法见图 7-1，当引出线 1、2、3 短接，4、5、6 分别接通电源时，电动机绕组接成 2Y 联接；当引出线 4、5、6 空接，1、2、3 分别接通电源时，电动机绕组接成 △ 联接。

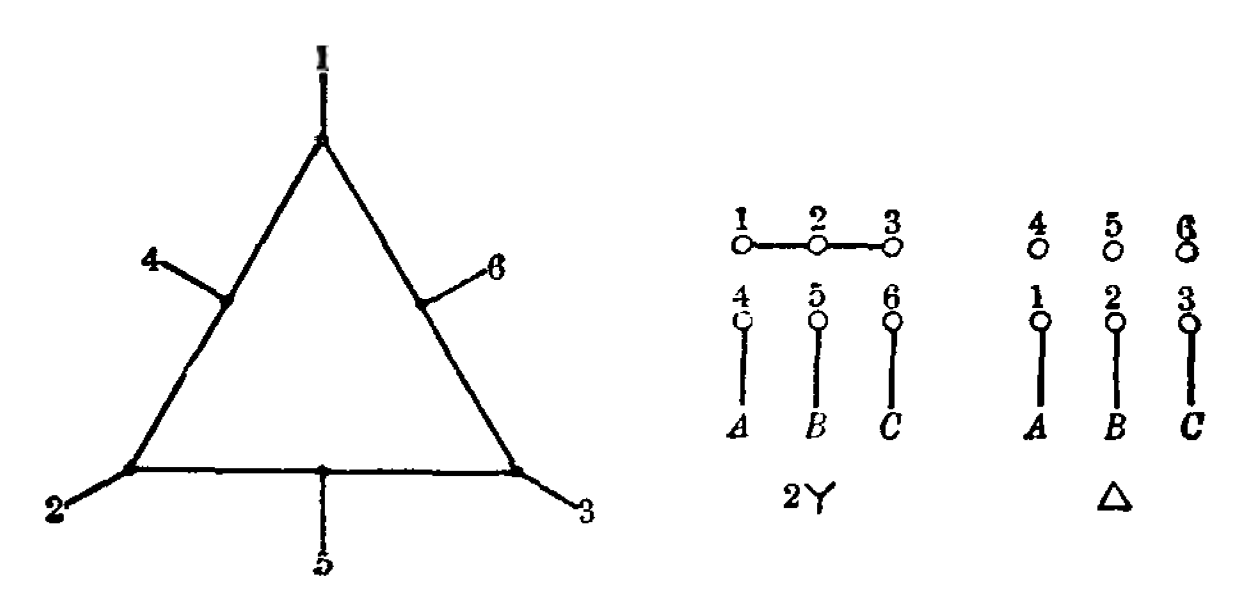


图 7-1　双速电动机的 2Y/△ 接法

这种 2Y/△ 接法双速电动机，可用开关控制，也可用交流接触器组合控制。

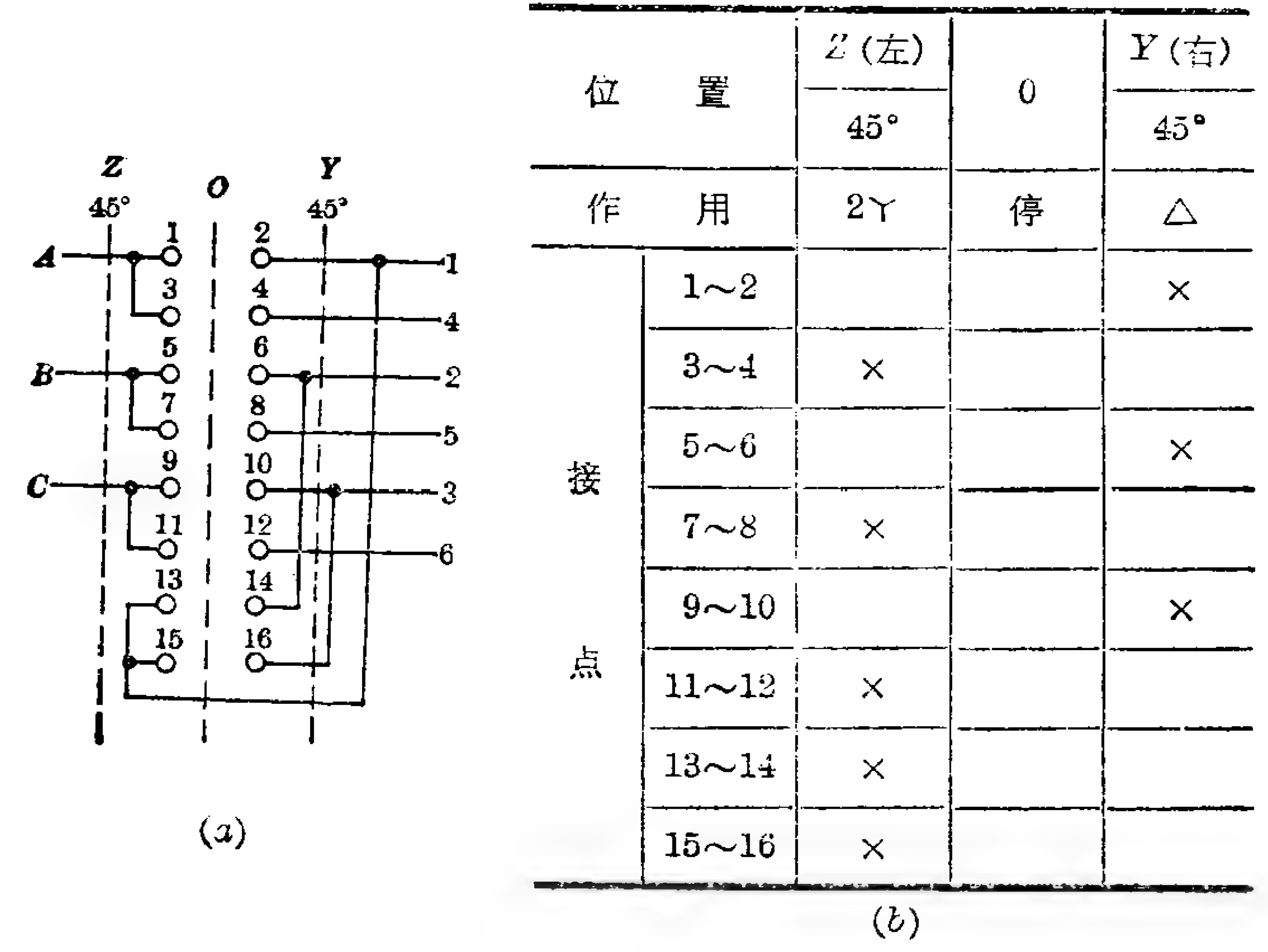
(1) 开关控制

1) 用 HZ3-451 双速电动机开关控制；

2) 用 HZ3-156 组合开关控制；

3) 用 HZ5-40-4M08(380V40A)双速电动机开关控制；

4) 用 LW5 万能转换开关改装后控制，开关的额定电流 15 安，额定电压 500 伏。这种开关体积小，可靠性尚好。图 7-2(*a*)是它的开关接线图，图 7-2(*b*)是开关在各位置上接点通断图（“×”号表示接通）。



位置		Z(左) 45°	0	Y(右) 45°
作用		2Y	停	△
接点	1~2			×
	3~4	×		
	5~6			×
	7~8	×		
	9~10			×
	11~12	×		
	13~14	×		
	15~16	×		

(*b*)

图 7-2　2Y/△ 接法的控制开关接线图(一)

LW5 万能转换开关操作如下：

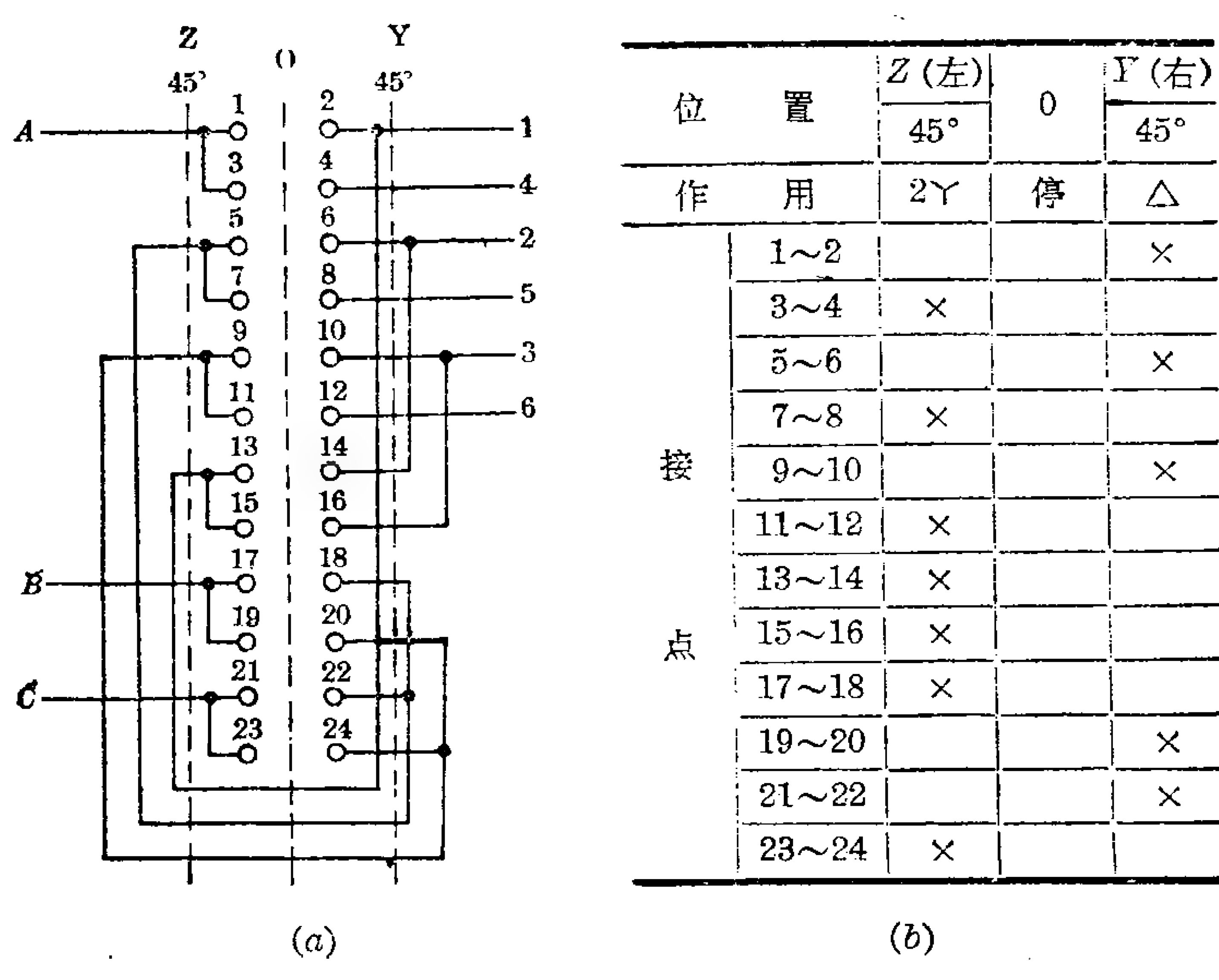
转换开关拨到左边 45° 位置时，接点 3~4、7~8、11~12、

13～14、15～16 接通。电源 A 接通引出线 4，电源 B 接通引出线 5，电源 C 接通引出线 6，引出线 1、2、3 短接，电动机绕组接成 2Y 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 1～2、5～6、9～10 接通，电源 A 接通引出线 1，电源 B 接通引出线 2，电源 C 接通引出线 3，引出线 4、5、6 空接，绕组接成 △ 联接。

转换开关拨到 0 位置，各接点均断开。电动机停转。

图 7-2 改装接线图在两种转速下电动机相序和绕组接线简图相符。如果原绕组方案为反转向方案，而运转时却要求两种转速下转向相同，则应该将一种转速下电动机相序颠倒过来，这可以在开关控制器中增加四对触头，开关接线见图 7-3(*a*)，各位置接点通断见图 7-3(*b*)。开关操作如下：



位置		Z (左) 45°	0	Y (右) 45°
作用		2Y	停	△
接点	1～2			×
	3～4	×		
	5～6			×
	7～8	×		
	9～10			×
	11～12	×		
	13～14	×		
	15～16	×		
	17～18	×		
	19～20			×
	21～22			×
	23～24	×		

(*a*)　　　　(*b*)

图 7-3　2Y/△ 接法的控制开关接线图(二)

转换开关拨到左边 45° 位置时接线相序和图 7-2 相同。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 1～2、5～6、9～10、19～20、21～22 接通，电源 A 接通引出线 1，电源 B 经接点 19、20 通至接点 9，再接通引出线 3，电源 C 经接点 21、22 通至接点 5，再接通引出线 2，引出线 4、5、6 空接。图 7-3 和图 7-2 接线图相比，可知两者区别仅在于电源线 B，C 对换，因而相序颠倒了过来，保证了两种极数时转向相同。

本章以后所介绍的 LW5 万能转换开关都可以用这种方法来颠倒相序，以满足电动机在各种转速下的转向要求。

以上四种开关控制器都是拨动式的。

(2) 交流接触器、按钮控制

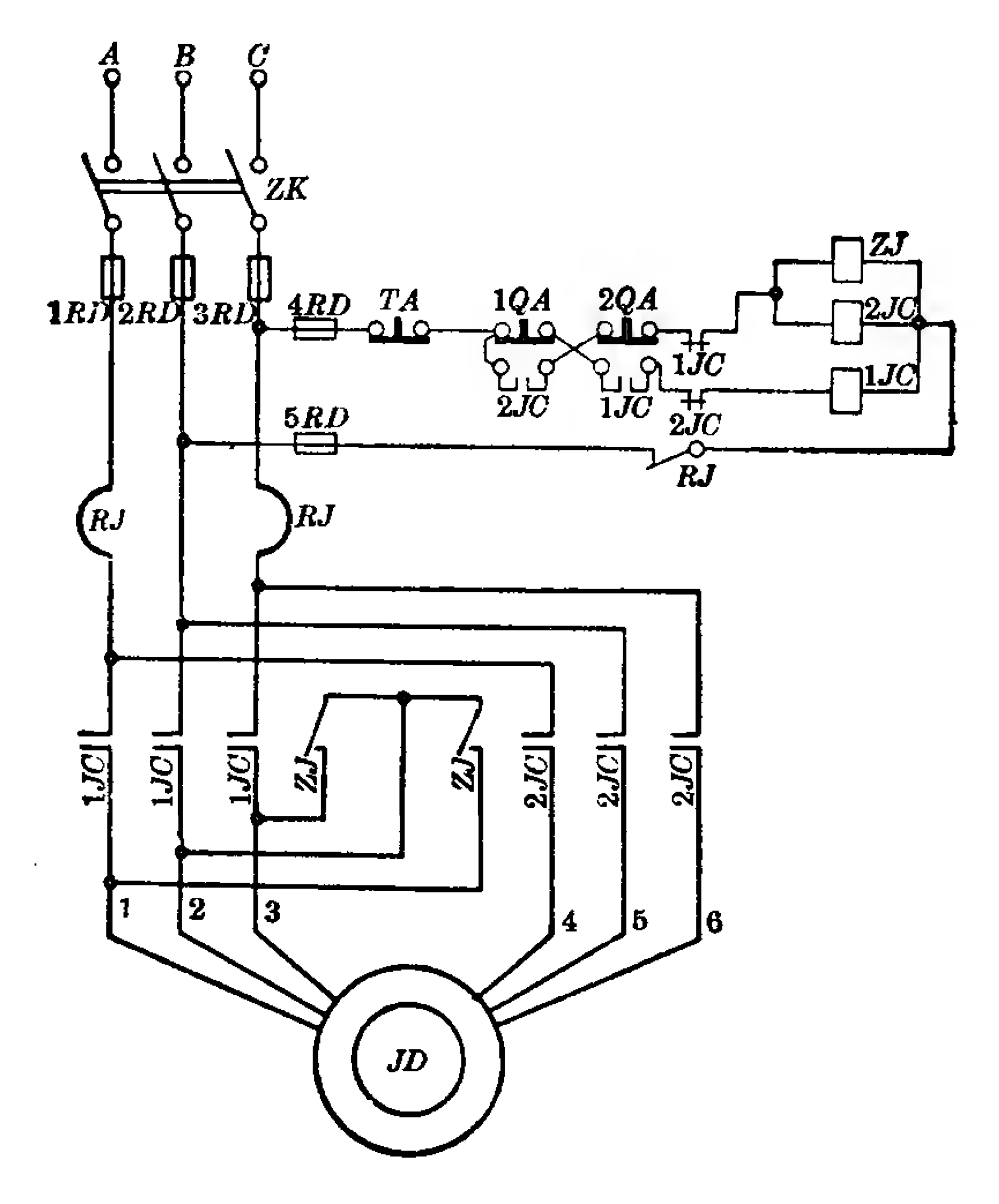
可用两只交流接触器、一只中间继电器(522 型或其他相同类型)和三只按钮组合控制。接触器触点电流的选择视电动机额定电流而定。如被控制的多速电动机额定功率在 2 千瓦以下，可用 JZ7 中间继电器代替交流接触器。本章以后所讨论的用交流接触器、按钮控制的各电路均可按此代用。

控制电路见图 7-4，电路操作如下：

接通主令开关 ZK，揿动按钮 $1QA$ 时，$2JC$，ZJ 触头闭合，电源 A 接通引出线 4，电源 B 接通引出线 5，电源 C 接通引出线 6，引出线 1、2、3 短接，电动机绕组接成 2Y 联接。辅助触头起自保和联锁作用。

揿动按钮 $2QA$ 时，$1JC$ 触头闭合，电源 A 接通引出线 1，电源 B 接通引出线 2，电源 C 接通引出线 3，引出线 4、5、6 空接，电动机绕组接成 △ 联接。辅助触头起自保和联锁作用。

如果原绕组系反转向方案，则为了使电动机在两种转速时保持相同转向，可将 $2JC$(或 $1JC$)主触头的任意两根电源进线对调(以下各控制电路均可用此法使电动机在各种极数



电器元件表

	符　　号	名　　称	数　量
1	*ZK*	主令开关	1
2	1*RD*～5*RD*	熔断器	5
3	*TA* 1*QA* 2*QA*	按　　钮	3
4	1*JC*	交流接触器	1
5	2*JC*	交流接触器	1
6	*ZJ*	中间继电器	1
7	*RJ*	热继电器	1
8	*JD*	双速电动机	1

图 7-4　2Y/△ 接法的接触器控制接线图

时保持同转向)。

本章所有交流接触器、按钮控制电路图中热继电器都只画一只。如果考虑各种极数时电动机额定电流不同，热继电器可以每种极数各用一只，各接在其相应的交流接触器触头电路中。同理，过流保护用的熔断器也可以各别使用，各接在其相应的交流接触器触头电路中。

2. 2Y/Y 接线方法的控制

2Y/Y 接线方法见图 7-5，当引出线 1、2、3 短接，4、5、6 分别接通电源时，电动机绕组接成 2Y 联接；当引出线 4、5、6 空接，1、2、3 分别接通电源时，电动机绕组接成 Y 联接。

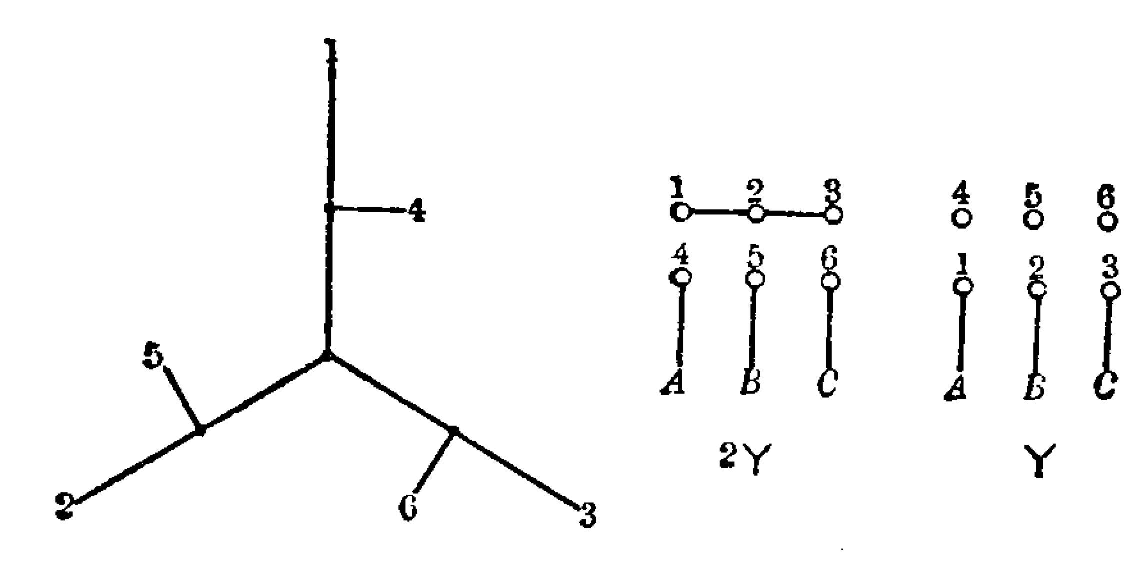


图 7-5 双速电动机的 2Y/Y 接法

这种 2Y/Y 接法双速电动机，同样可用开关控制和交流接触器组合控制。开关接线和控制电路均和 2Y/△ 接线方法相同。

3. 2△/Y 接线方法的控制

2△/Y 接线方法见图 7-6，当电源 A 接通引出线 1、3、7，电源 B 接通引出线 2、4、6，电源 C 接通引出线 5、8 时，电动机绕组接成 2△ 联接；当电源 A 接通引出线 1，电源 B 接通引出线 4，电源 C 接通引出线 7，引出线 2、5、8 空接，3、6 短接时，电动机绕组接成 Y 联接。

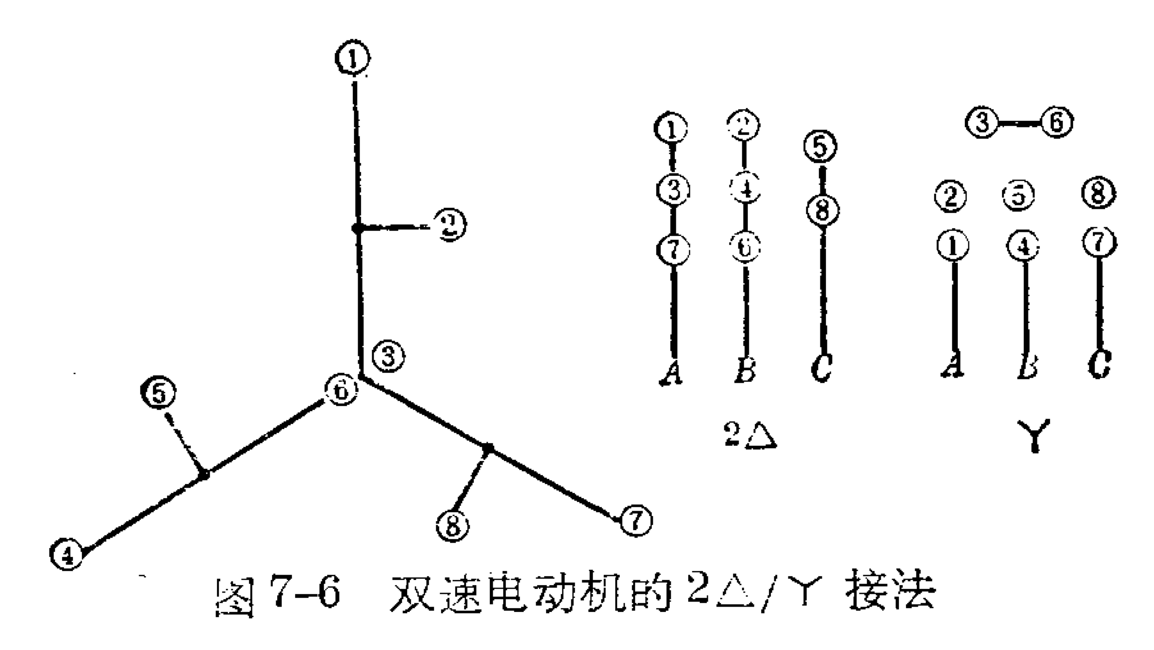


图 7-6　双速电动机的 2△/Y 接法

这种 2△/Y 双速电动机也可用开关和交流接触器组合两种方法控制。

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制，改装接线见图 7-7(*a*)，各位置接点通断情况见图 7-7(*b*)。开关操作如下：

(*a*)

位置		*Z*（左）45°	0	*Y*（右）45°
作用		2△	停	Y
接点	1～2	×		×
	3～4	×		
	5～6	×		
	7～8	×		
	9～10	×		×
	11～12	×		
	13～14	×		
	15～16	×		
	17～18			×
	19～20			×

(*b*)

图 7-7　2△/Y 接法的控制开关接线图

转换开关拨到左边 45° 位置时，接点 1～2、3～4、5～6、7～8、9～10、11～12、13～14、15～16 接通，电源 A 接通引出线 1、3、7，电源 B 接通引出线 2、4、6，电源 C 接通引出线 5、8，电动机绕组接成 2△ 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 1～2、9～10、17～18、19～20 接通，电源 A 接通引出线 1，电源 B 接通引出线 4，电源 C 接通引出线 7，引出线 2、5、8 空接，3、6 短接。电动机绕组接成 Y 联接。

转换开关拨到 0 位置，各接点均断开，电动机停转。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图 7-8，电路操作如下：

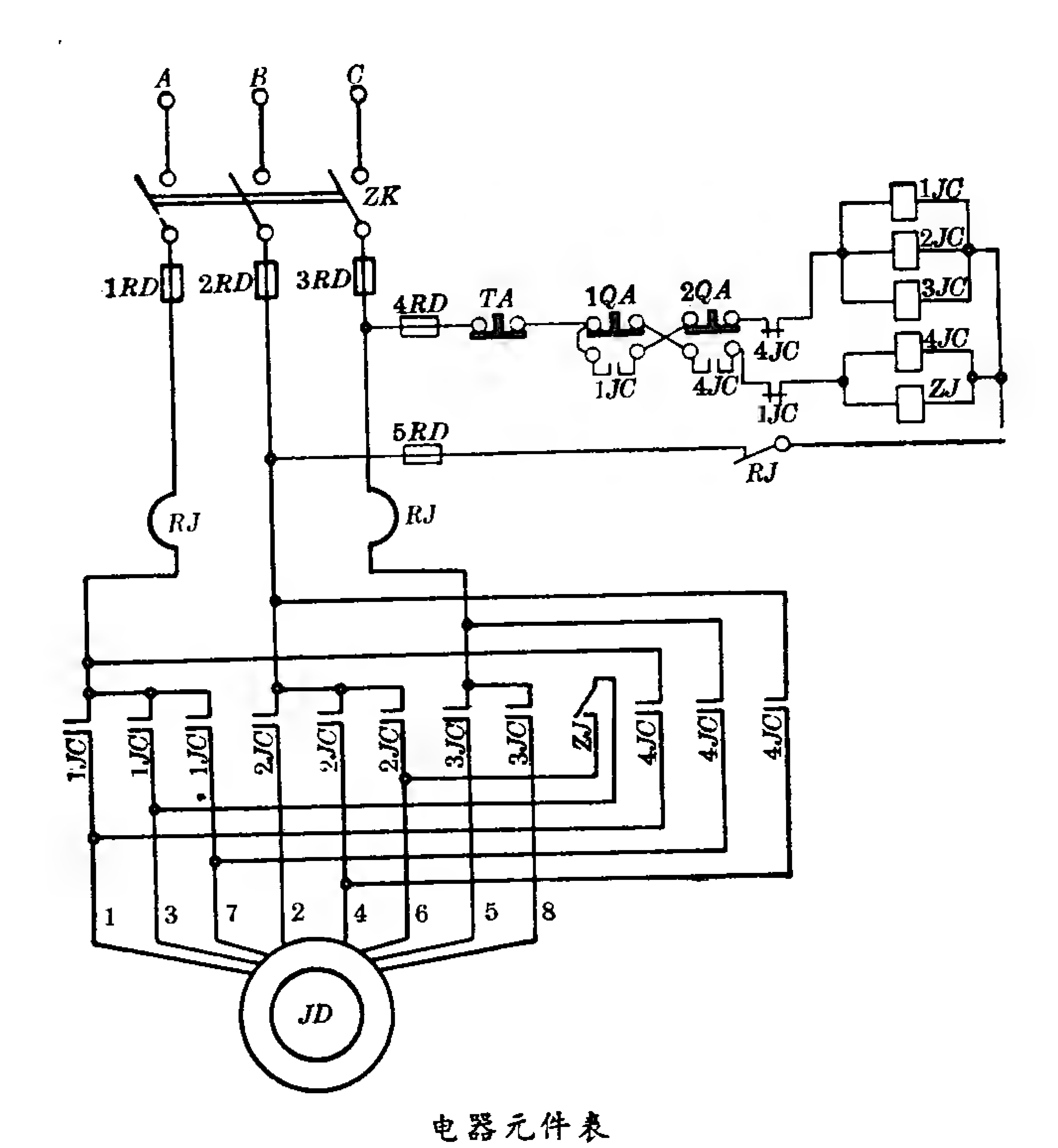
接通主令开关 ZK，揿动按钮 $1QA$ 时，$1JC$、$2JC$、$3JC$ 触头闭合，电源 A 接通引出线 1、3、7，电源 B 接通引出线 2、4、6，电源 C 接通引出线 5、8，电动机绕组接成 2△ 联接。辅助触头起自保和联锁作用。

揿动按钮 $2QA$ 时，$4JC$、ZJ 触头闭合，电源 A 接通引出线 1，电源 B 接通引出线 4，电源 C 接通引出线 7，引出线 2、5、8 空接，引出线 3、6 短接，电动机绕组接成 Y 联接。辅助触头起自保和联锁作用。

本章以后所介绍的交流接触器、按钮控制各电路中，辅助触头均起自保和联锁作用，下文不再重复。

4. 2Y/2Y 接线方法的控制

2Y/2Y 接线方法见图 7-9，当电源 A 接通引出线 1、2，电源 B 接通引出线 4、5，电源 C 接通引出线 7、8，引出线 3、6、9 短接时，电动机绕组接成第一种 2Y 联接；当电源 A 接通引出线 1、3，电源 B 接通引出线 4、6，电源 C 接通引出线 7、9，引出线 2、5、8 短接时，电动机绕组接成第二种 2Y 联接。



电器元件表

	符　　号	名　　称	数　　量
1	ZK	主令开关	1
2	$1RD \sim 5RD$	熔　断　器	5
3	TA $1QA$ $2QA$	按　　钮	3
4	$1JC$	交流接触器	1
5	$2JC$	交流接触器	1
6	$3JC$	交流接触器	1
7	$4JC$	交流接触器	1
8	ZJ	中间继电器	1
9	RJ	热 继 电 器	1
10	JD	双速电动机	1

图 7-8　2△/Y 接法的接触器控制接线图

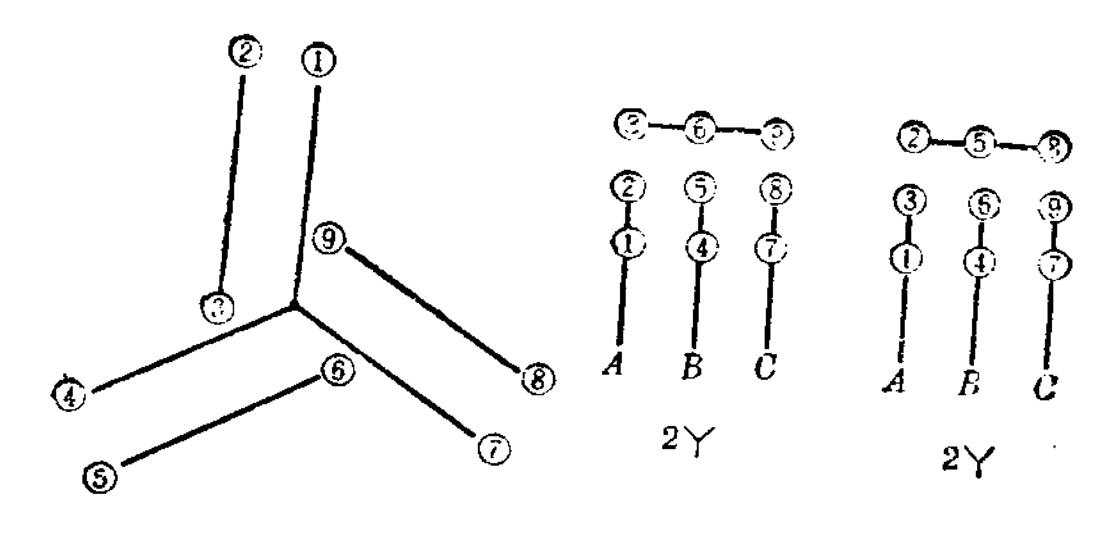


图 7-9　双速电动机的 2Y/2Y 接法

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制．开关接线及各位置接点通断情况见图 7-10，开关操作如下：

(a)

(b)

位置		Z (左) 45°	0	Y (右) 45°
作用		2Y	停	2Y
接点	1～2	×		×
	3～4	×		
	5～6			×
	7～8	×		×
	9～10	×		
	11～12			×
	13～14	×		×
	15～16	×		
	17～18			×
	19～20	×		
	21～22	×		
	23～24			×
	25～26			×

图 7-10　2Y/2Y 接法的控制开关接线图

转换开关拨到左边 45° 位置时，接点 1～2、3～4、7～8、9～10、13～14、15～16、19～20、21～22 接通，电源 A 接通引出线 1、2，电源 B 接通引出线 4、5，电源 C 接通引出线 7、8，引出线 3、6、9 短接，电动机绕组接成第一种 2Y 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 1～2、5～6、7～8、11～12、13～14、17～18、23～24、25～26 接通，电源 A 接通引出线 1、3，电源 B 接通引出线 4、6，电源 C 接通引出线 7、9，引出线 2、5、8 短接，电动机绕组接成第二种 2Y 联接。

转换开关拨到 0 位置，各接点均断开，电动机停转。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图 7-11，电路操作如下：

接通主令开关 ZK，揿动按钮 $1QA$ 时，$1JC$、$2JC$、$1ZJ$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线 1、2，4、5，7、8，引出线 3、6、9 短接，电动机绕组接成第一种 2Y 联接。

揿动按钮 $2QA$ 时，$3JC$、$4JC$、$2ZJ$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线 1、3，4、6，7、9，引出线 2、5、8 短接，电动机绕组接成第二种 2Y 联接。

5. ⩟/⩟ 接线方法的控制

⩟/⩟ 接线方法见图 7-12，当电源 A 接通引出线 4、7，电源 B 接通引出线 5、8，电源 C 接通引出线 6、9，引出线 1、2、3 空接时，电动机绕组接成第一种 ⩟ 联接；当电源 A 接通引出线 2、7，电源 B 接通引出线 1、9，电源 C 接通引出线 3、8，引出线 4、5、6 空接时，电动机绕组接成第二种 ⩟ 联接。

这种 ⩟/⩟ 接法双速电动机也可用开关和交流接触器组合两种方法控制。

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制，开关接线及各位置接

电器元件表

	符　　号	名　　称	数量
1	ZK	主令开关	1
2	$1RD \sim 5RD$	熔　断　器	5
3	TA $1QA$ $2QA$	按　　钮	3
4	$1JC$	交流接触器	1
5	$2JC$	交流接触器	1
6	$3JC$	交流接触器	1
7	$4JC$	交流接触器	1
8	$1ZJ$ $2ZJ$	中间继电器	2
9	RJ	热继电器	1
10	JD	双速电动机	1

图 7-11　2Y/2Y 接法的接触器控制接线图

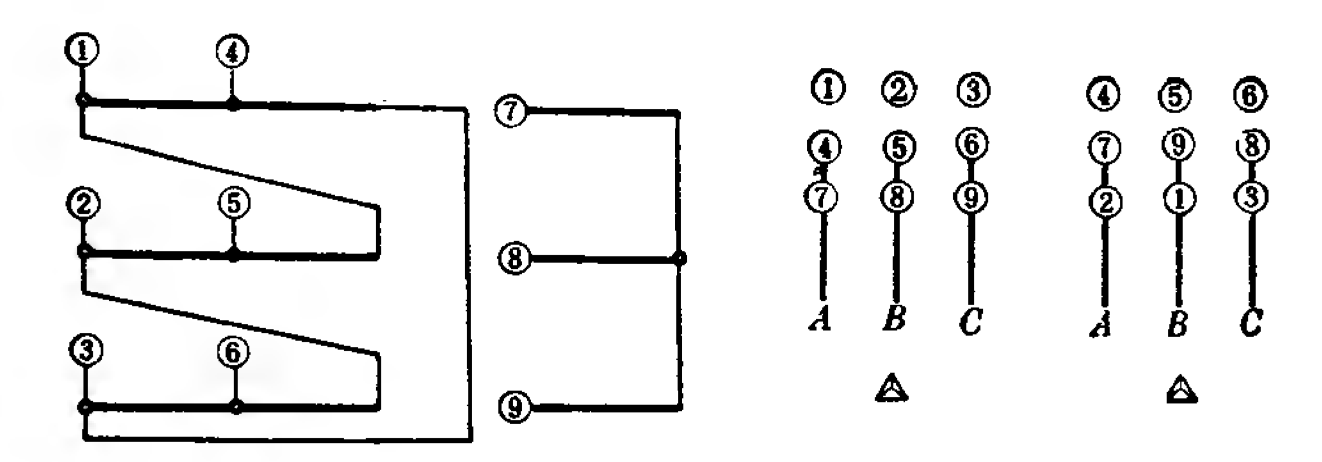


图 7-12　双速电动机的 △/△ 接法

点通断情况见图 7-13，开关操作如下：

转换开关拨到左边 45° 位置时，接点 1～2、3～4、5～6、7～8、9～10、11～12 接通，电源 A、B、C 分别接通引出线 4、7，5、8，6、9，引出线 1、2、3 空接，绕组接成第一种 △ 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 3～4、7～8、11～12、13～14、15～16、17～18 接通，电源 A、B、C 分别接通引出线 2、7，3、8，1、9，引出线 4、5、6 空接，电动机绕组接成第二种

(a)

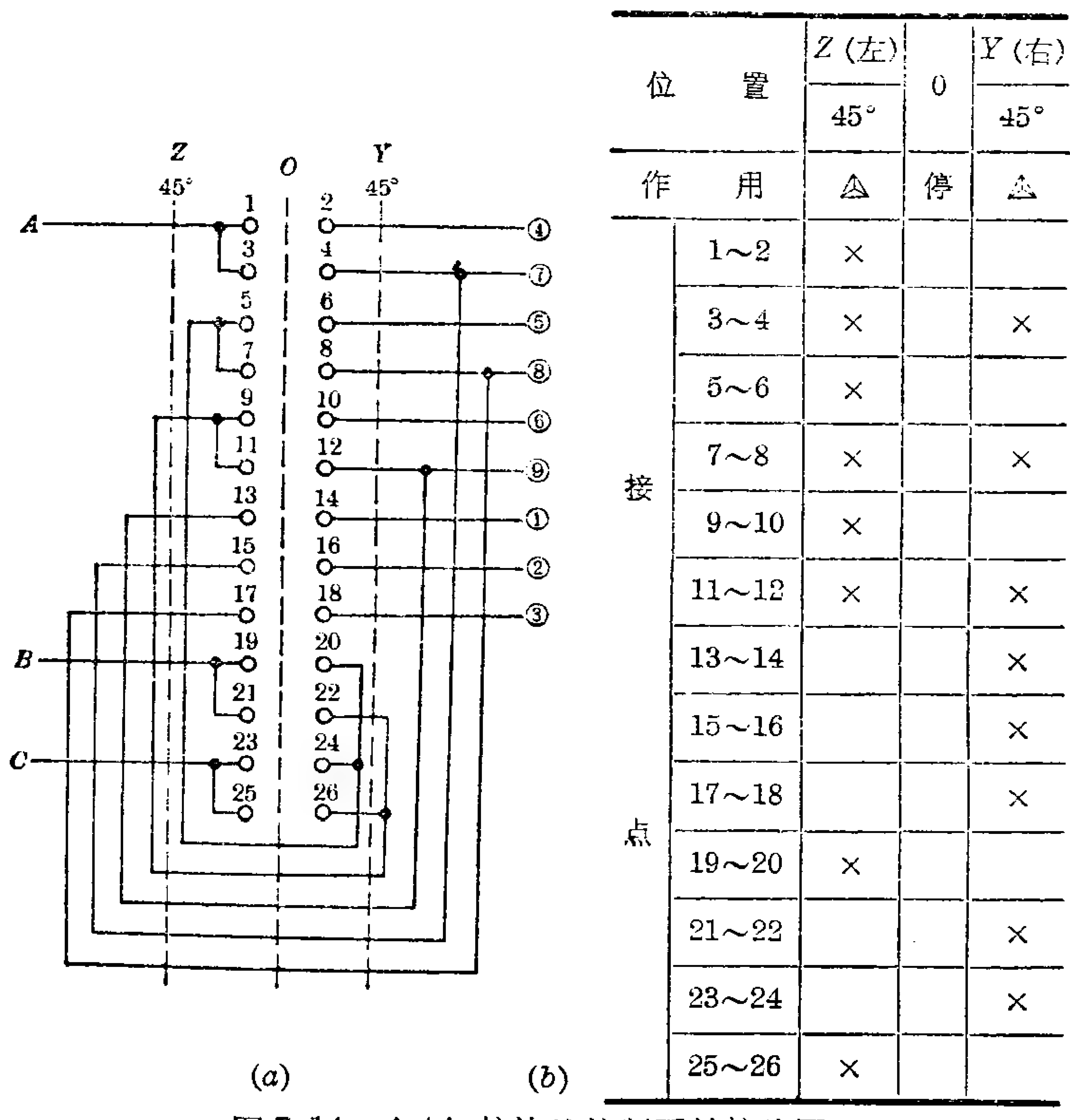
位　　置		Z (左) 45°	0	Y (右) 45°
作　　用		△	停	△
接点	1～2	×		
	3～4	×		×
	5～6	×		
	7～8	×		×
	9～10	×		
	11～12	×		×
	13～14			×
	15～16			×
	17～18			×

(b)

图 7-13　△/△ 接法的控制开关接线图(两种接法相序相反)

△联接，但是相序与图 7-12 的绕组接线图相反（B、C 两根电源线对换）。

如果第二种 △ 接法时要保持原绕组接线图中的相序，即把相序再反过来，可增加四对触头。改装接线见图 7-14。



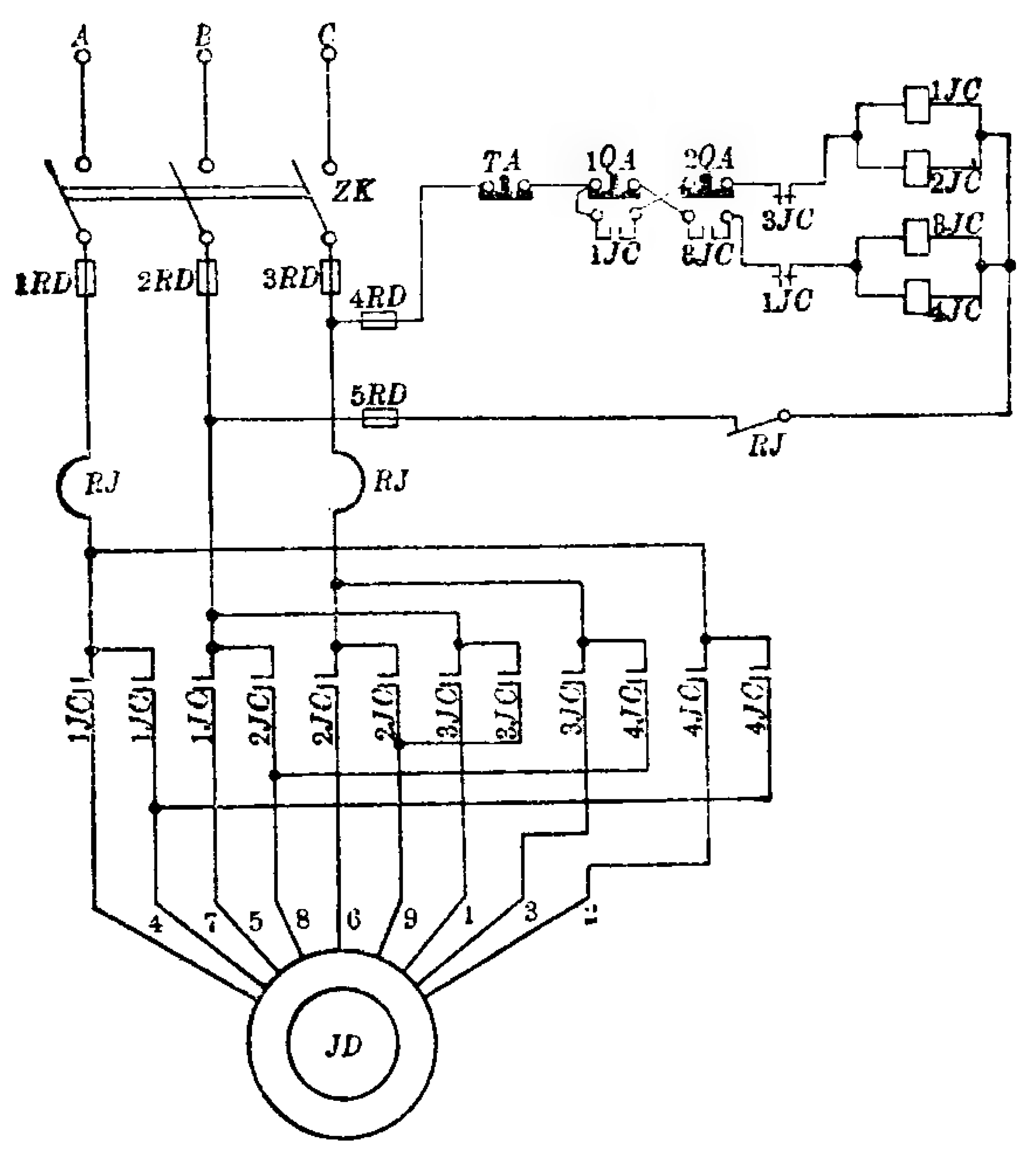
位　置		Z (左) 45°	0	Y (右) 45°
作　用		△	停	△
接点	1～2	×		
	3～4	×		×
	5～6	×		
	7～8	×		×
	9～10	×		
	11～12	×		×
	13～14			×
	15～16			×
	17～18			×
	19～20	×		
	21～22			×
	23～24			×
	25～26	×		

图 7-14　△/△ 接法的控制开关接线图

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图 7-15，电路操作如下：

接通主令开关 ZK，揿动按钮 $1QA$ 时，$1JC$、$2JC$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线 4、7，5、8，6、9，引出线 1、



电器元件表

	符　　号	名　　称	数　量
1	ZK	主令开关	1
2	$1RD \sim 5RD$	熔　断　器	5
3	TA $1QA$ $2QA$	按　　钮	3
4	$1JC$	交流接触器	1
5	$2JC$	交流接触器	1
6	$3JC$	交流接触器	1
7	$4JC$	交流接触器	1
8	RJ	热继电器	1
9	JD	双速电动机	1

图 7-15　△/△ 接法的接触器控制接线图

2、3 空接，电动机绕组接成第一种 △ 联接。

撳动按钮 2*QA* 时，3*JC*、4*JC* 触头闭合，电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 2、7，1、9，3、8，引出线 4、5、6 空接，电动机绕组接成第二种 △ 联接。

第二节　三速电动机的控制

1．2Y/2Y/2Y 接线方法的控制

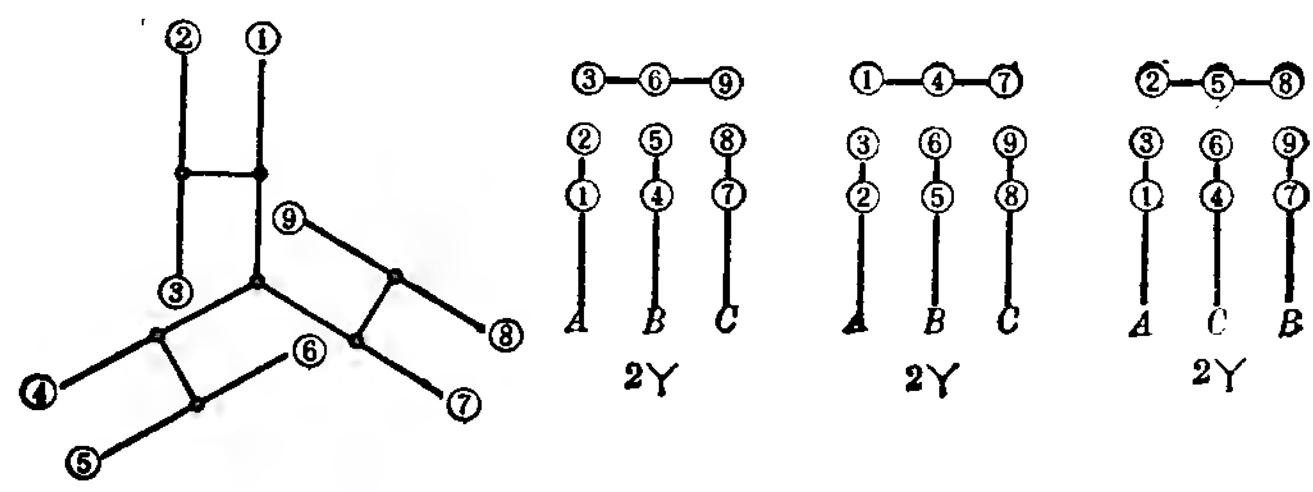


图 7-16　三速电动机的 2Y/2Y/2Y 接法

2Y/2Y/2Y 接线方法见图 7-16，当电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 1、2，4、5，7、8，引出线 3、6、9 短接时，电动机绕组接成第一种 2Y 联接；当电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 2、3，5、6，8、9，引出线 1、4、7 短接时，电动机绕组接成第二种 2Y 联接；当电源 *A*、*C*、*B* 分别接通引出线 1、3，4、6，7、9，引出线 2、5、8 短接时，电动机绕组接成第三种 2Y 联接。

这种 2Y/2Y/2Y 接法的三速电动机，也可用开关和交流接触器组合两种方法控制。

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制，开关接线及各位置接点通断情况见图 7-17，开关操作如下：

转换开关拨到左边 45° 位置时，接点 1～2、3～4、7～8、9～10、17～18、21～22、27～28、29～30 接通，电源 *A*、*B*、*C* 分

(a)

(b)

位置		Z (左)	0	Y (右)		
		45°		45°	90°	135°
作用		2Y	停	2Y	停	2Y
接点	1~2	×				×
	3~4	×		×		
	5~6			×		×
	7~8	×		×		
	9~10	×				
	11~12			×		
	13~14					×
	15~16					×
	17~18	×		×		
	19~20			×		
	21~22	×				
	23~24					×
	25~26					×
	27~28	×				
	29~30	×				
	31~32			×		
	33~34			×		
	35~36					×
	37~38					×

图 7-17　2Y/2Y/2Y 接法的控制开关接线图

别接通引出线1、2，4、5，7、8，引出线3、6、9短接，电动机绕组接成第一种2Y联接。

转换开关拨到右边45°位置时，接点3～4、5～6、7～8、11～12、17～18、19～20、31～32、33～34接通，电源A、B、C分别接通引出线2、3，5、6，8、9，引出线1、4、7短接，电动机绕组接成第二种2Y联接。

转换开关拨到右边135°位置时，接点1～2、5～6、13～14、15～16、23～24、25～26、35～36、37～38接通，电源A、B、C分别接通引出线1、3，7、9，4、6，引出线2、5、8短接，电动机绕组接成第三种2Y联接。

这里要说明一点，为了使第三种2Y接法时电动机转向和前两种2Y接法时转向相同，所以当转换开关拨到右边135°位置时，已将B、C两根电源线对调。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图7-18，电路操作如下：

接通主令开关ZK，揿动按钮1QA时，1JC、2JC、1ZJ触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线1、2，4、5，7、8，引出线3、6、9短接，电动机绕组接成第一种2Y联接。

先揿动停止按钮TA，再揿动按钮2QA时，3JC、4JC、2ZJ触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线2、3，5、6，8、9，引出线1、4、7短接，电动机绕组接成第二种2Y联接。

先揿动停止按钮TA，再揿动按钮3QA时，5JC、6JC、3ZJ触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线1、3，7、9，4、6，引出线2、5、8短接，电动机绕组接成第三种2Y联接。

这种控制电路变换转速时，须先揿动停止按钮后才能变速。如果用双向控制按钮和交流接触器等组合，电动机可以直接变换转速。这种控制电路见图7-19。

电器元件表

	符　号	名　称	数量
1	ZK	主令开关	1
2	1RD～5RD	熔断器	5
3	TA 1QA 2QA 3QA	按钮	4
4	1JC	交流接触器	1
5	2JC	交流接触器	1
6	3JC	交流接触器	1
7	4JC	交流接触器	1
8	5JC	交流接触器	1
9	6JC	交流接触器	1
10	1ZJ 2ZJ 3ZJ	中间继电器	3
11	RJ	热继电器	1
12	JD	三速电动机	1

图 7-18　2Y/2Y/2Y 接法的接触器控制接线图

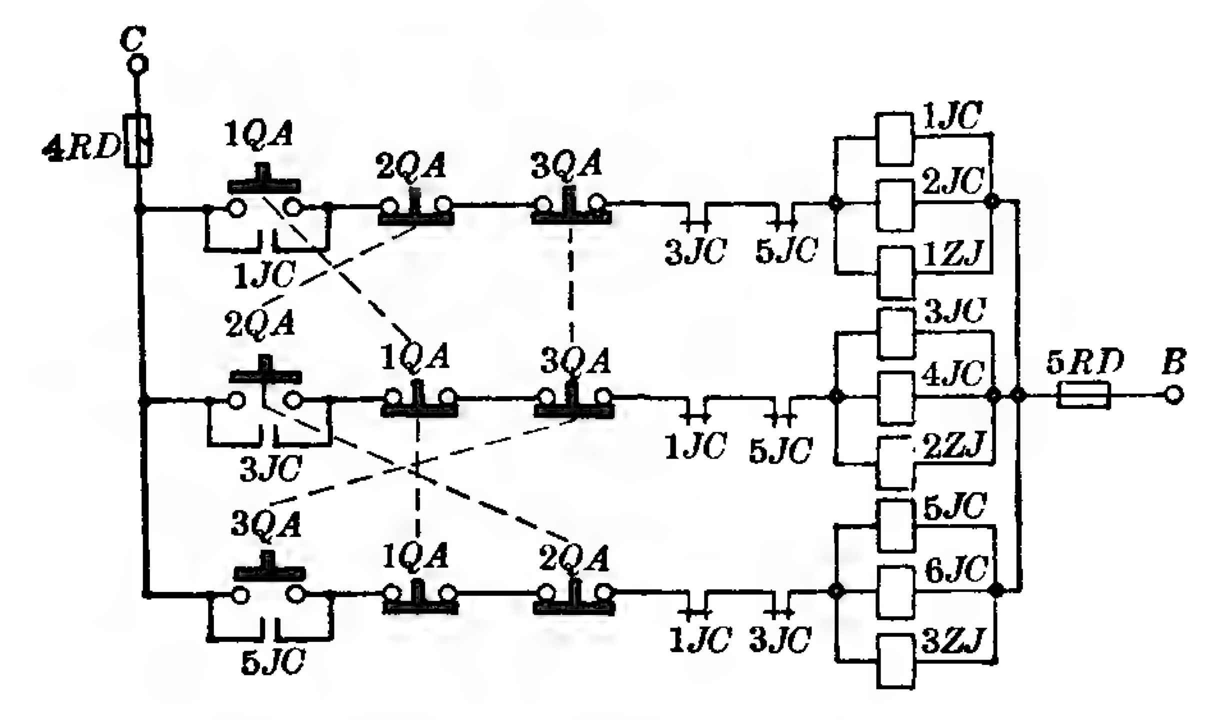


图 7-19 用双向按钮的控制电路

2. 2△/2△/2Y 接线方法的控制

2△/2△/2Y 接线方法见图 7-20，当电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 1、4、9，2、5、6，3、7、8 时，电动机绕组接成第一种 2△ 联接；当电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 1、5、8，2、4、7，3、6、9 时，电动机绕组接成第二种 2△ 联接；当电源 *A*、*B*、*C* 分别接通引出线 4、5，6、7，8、9，引出线 1、2、3 短接时，电动机绕组接成 2Y 联接。

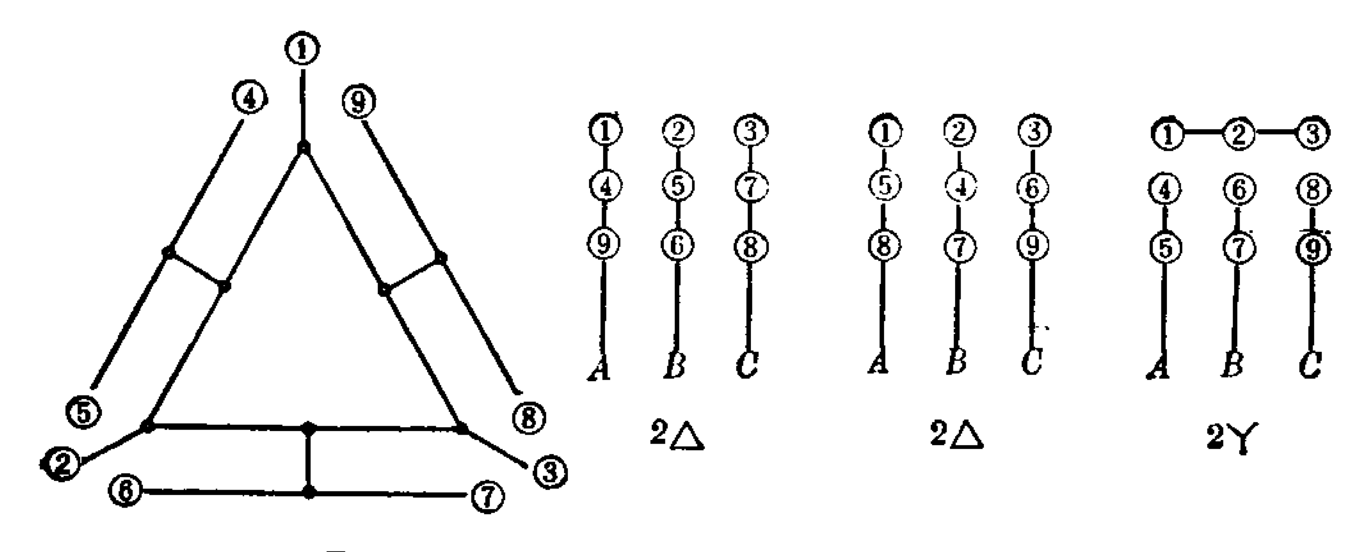


图 7-20 三速电动机的 2△/2△/2Y 接法

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制，开关接线及各位置接点通断情况见图 7-21，开关操作如下：

(a)

(b)

位置		Z (左)	0	Y (右)		
		45°		45°	90°	135°
作用		2△	停	2△	停	2Y
接点	1～2	×		×		
	3～4	×				×
	5～6			×		×
	7～8	×		×		
	9～10	×				×
	11～12			×		×
	13～14	×		×		
	15～16	×				×
	17～18			×		×
	19～20	×				
	21～22	×				
	23～24	×				
	25～26			×		
	27～28			×		
	29～30			×		
	31～32					×
	33～34					×

图 7-21 2△/2△/2Y 接法的控制开关接线图

转换开关拨到左边45°位置时，接点1～2、3～4、7～8、9～10、13～14、15～16、19～20、21～22、23～24接通，电源A、B、C分别接通引出线1、4、9，2、5、6，3、7、8，电动机绕组接成第一种2△联接。

转换开关拨到右边45°位置时，接点1～2、5～6、7～8、11～12、13～14、17～18、25～26、27～28、29～30接通，电源A、B、C分别接通引出线1、5、8，2、4、7，3、6、9，电动机绕组接成第二种2△联接。

转换开关拨到右边135°位置时，接点3～4、5～6、9～10、11～12、15～16、17～18、31～32、33～34接通，电源A、B、C分别接通引出线4、5，6、7，8、9，引出线1、2、3短接，电动机绕组接成2Y联接。

如果对电动机三种转速下运行的转向有一定要求，可以增加四对触头将两根电源线对调。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图7-22，电路操作如下：

接通主令开关ZK，揿动按钮$1QA$时，$1JC$、$2JC$、$3JC$触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线1、4、9，2、5、6，3、7、8，电动机绕组接成第一种2△联接。

揿动停止按钮TA，再揿动按钮$2QA$时，$4JC$、$5JC$、$6JC$触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线1、5、8，2、4、7，3、6、9，电动机绕组接成第二种2△联接。

揿动停止按钮TA，再揿动按钮$3QA$时，$7JC$、$8JC$、ZJ触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线4、5，6、7，8、9，引出线1、2、3短接，电动机绕组接成2Y联接。

这种控制电路同样须先停车后再变速。如果用双向控制按钮和交流接触器等组合控制，电动机可直接变换转速。控

电器元件表

	符　　号	名　　称	数　量
1	ZK	主令开关	1
2	$1RD\sim5RD$	熔　断　器	5
3	TA $1QA$ $2QA$ $3QA$	按　　钮	4
4	$1JC$	交流接触器	1
5	$2JC$	交流接触器	1
6	$3JC$	交流接触器	1
7	$4JC$	交流接触器	1
8	$5JC$	交流接触器	1
9	$6JC$	交流接触器	1
10	$7JC$	交流接触器	1
11	$8JC$	交流接触器	1
12	ZJ	中间继电器	1
13	RJ	热继电器	1
14	JD	三速电动机	1

图 7-22　2△/2△/2Y 接法的接触器控制接线图

制电路见图 7-19。

3．2△/2Y/2Y 接线方法的控制

2△/2Y/2Y 接线方法见图 7-23，当电源 A、B、C 分别接通引出线 1、2、11、12，3、4、5、6，7、8、9、10 时，电动机绕组接成 2△ 联接；当电源 A、B、C 分别接通引出线 2、3，6、7，10、11，引出线 1、5、9 和 4、8、12 分别短接时，电动机绕组接成第一种 2Y 联接；当电源 A、B、C 分别接通引出线 1、3，5、7，9、11，引出线 2、6、10 和 4、8、12 分别短接时，电动机绕组接成第二种 2Y 联接。

这种 2△/2Y/2Y 接法的三速电动机也可用开关和交流接触器组合两种方法控制。

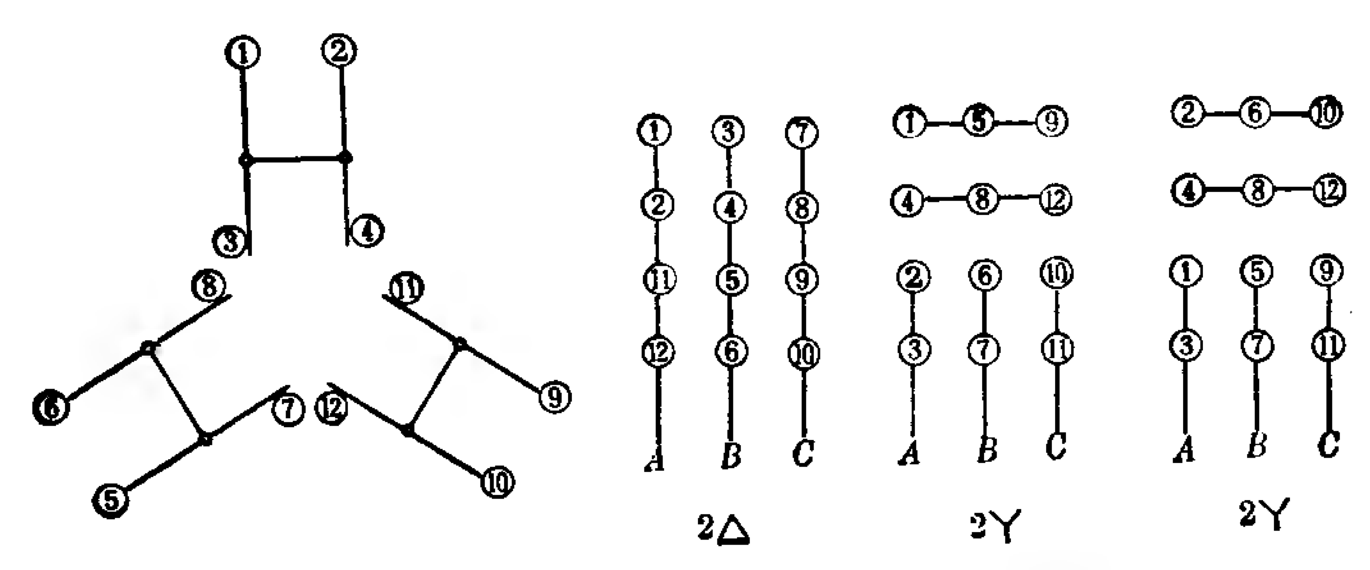


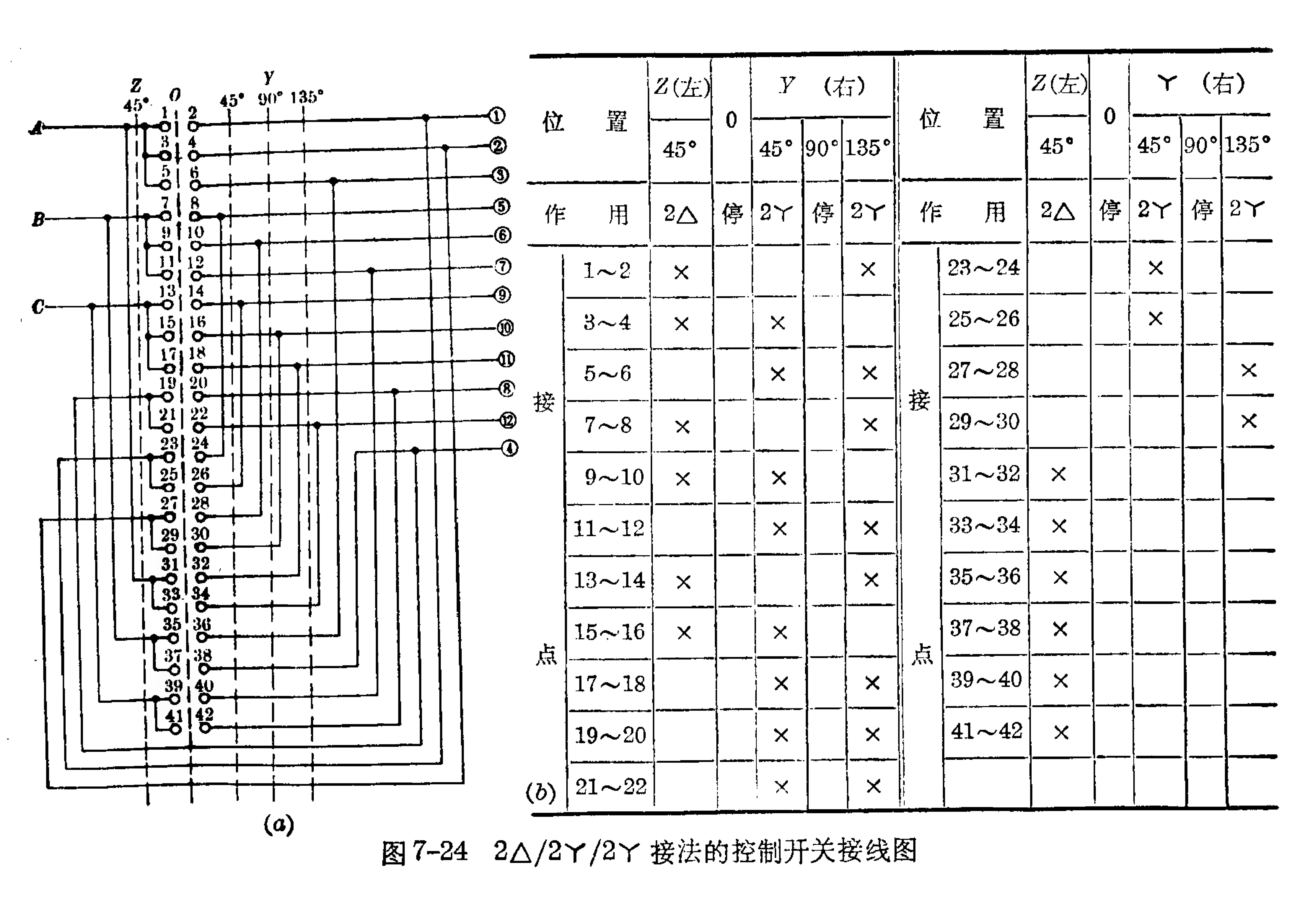
图 7-23　三速电动机的 2△/2Y/2Y 接法

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制，开关接线及各位置接点通断情况见图 7-24，开关操作如下：

转换开关拨到左边 45° 位置，接点 1～2、3～4、7～8、9～10、13～14、15～16、31～32、33～34、35～36、37～38、39～40、41～42 接通，电源 A、B、C 分别接通引出线 1、2、11、12，3、4、5、6，7、8、9、10，电动机绕组接成 2△ 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时，接点 3～4、5～6、9～10、



位置	Z(左) 45°	0	Y (右) 45°	Y (右) 90°	Y (右) 135°
作用	2△	停	2Y	停	2Y
接点 1～2	×				×
3～4	×		×		
5～6			×		×
7～8	×				×
9～10	×		×		
11～12			×		×
13～14	×				×
15～16	×		×		
17～18			×		×
19～20			×		×
21～22			×		×
23～24			×		
25～26			×		
27～28					×
29～30					×
31～32	×				
33～34	×				
35～36	×				
37～38	×				
39～40	×				
41～42	×				

(b)

图 7-24　2△/2Y/2Y 接法的控制开关接线图

11～12、15～16、17～18、19～20、21～22、23～24、25～26接通，电源 A、B、C 分别接通引出线2、3，6、7，10、11，引出线1、5、9，4、8、12短接，电动机绕组接成第一种2Y联接。

转换开关拨到右边135°位置时，接点1～2、5～6、7～8、11～12、13～14、17～18、19～20、21～22、27～28、29～30接通，电源 A、B、C 分别接通引出线1、3，5、7，9、11，引出线2、6、10，4、8、12短接，电动机绕组接成第二种2Y联接。

如果对电动机在三种转速下运行转向有一定要求，可以增加四对触头将两根电源线对调。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图7-25，电路操作如下：

接通主令开关 ZK，揿动按钮 $1QA$ 时，$1JC$、$2JC$、$3JC$、$4JC$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线1、2、11、12，3、4、5、6，7、8、9、10，电动机绕组接成2△联接。

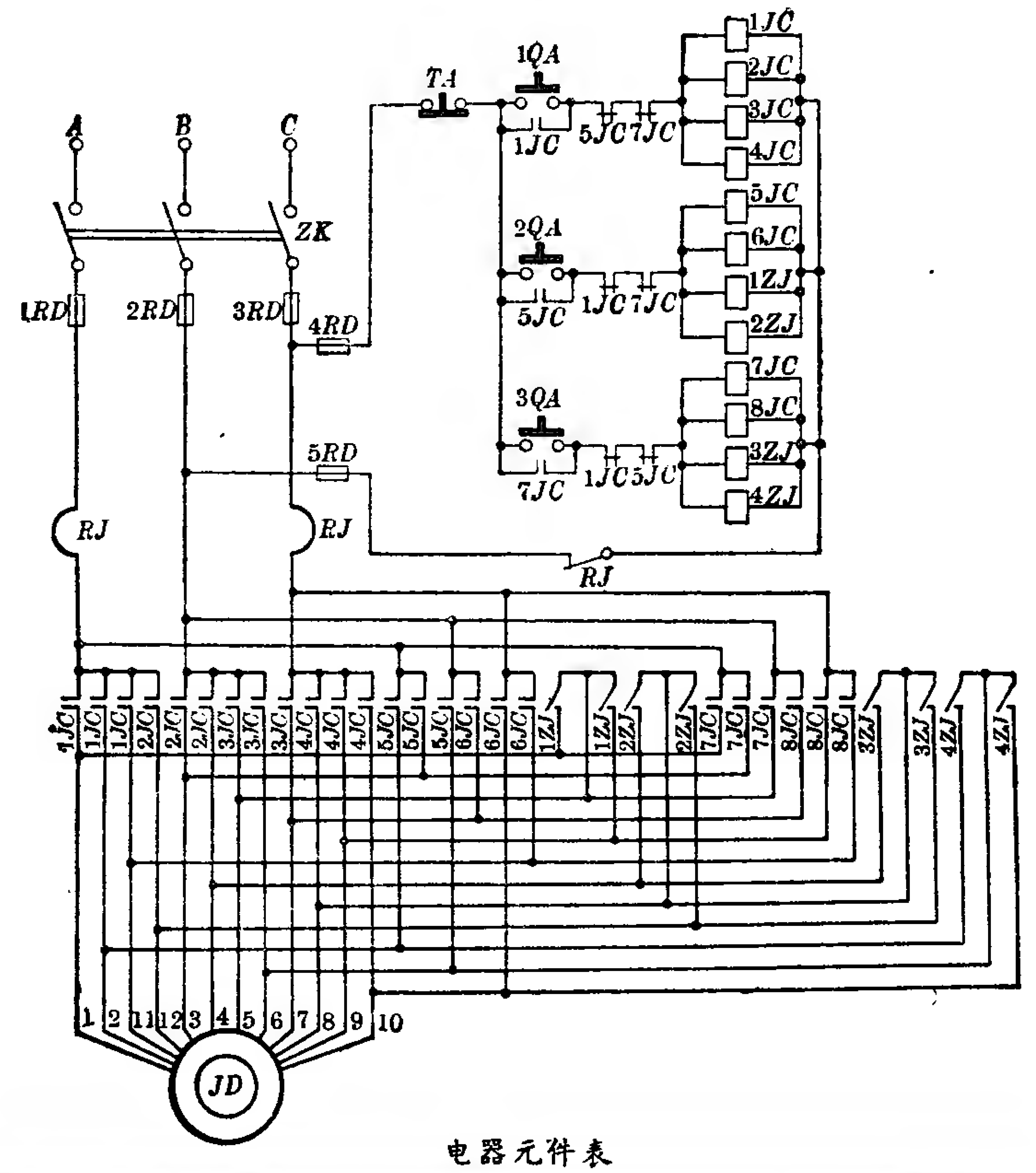
揿动停止按钮 TA，再揿动按钮 $2QA$ 时，$5JC$、$6JC$、$1ZJ$、$2ZJ$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线2、3，6、7，10、11，引出线1、5、9和4、8、12分别短接，电动机绕组接成第一种2Y联接。

揿动停止按钮 TA，再揿动按钮 $3QA$ 时，$7JC$、$8JC$、$3ZJ$、$4ZJ$ 触头闭合，电源 A、B、C 分别接通引出线1、3，5、7，9、11，引出线2、6、10和4、8、12分别短接，电动机绕组接成第二种2Y联接。

这种控制电路同样须先停车后再变速。如果用双向控制按钮和交流接触器等组合控制，电动机可直接变换转速，控制电路见图7-19。

4. ⩟/⩟/3Y接线方法的控制

⩟/⩟/3Y接线方法见图7-26，当电源 A、B、C 分别接



电器元件表

	符　　号	名　　称	数量		符　　号	名　　称	数量
1	ZK	主令开关	1	8	5JC	交流接触器	1
2	1RD～5RD	熔　断　器	5	9	6JC	交流接触器	1
3	TA 1QA 2QA 3QA	按　　钮	4	10	7JC	交流接触器	1
				11	8JC	交流接触器	1
4	1JC	交流接触器	1	12	1ZJ 2ZJ 3ZJ 4ZJ	中间继电器	4
5	2JC	交流接触器	1				
6	3JC	交流接触器	1	13	RJ	热继电器	1
7	4JC	交流接触器	1	14	JD	三速电动机	1

图 7-25　2△/2Y/2Y 接法的接触器控制接线图

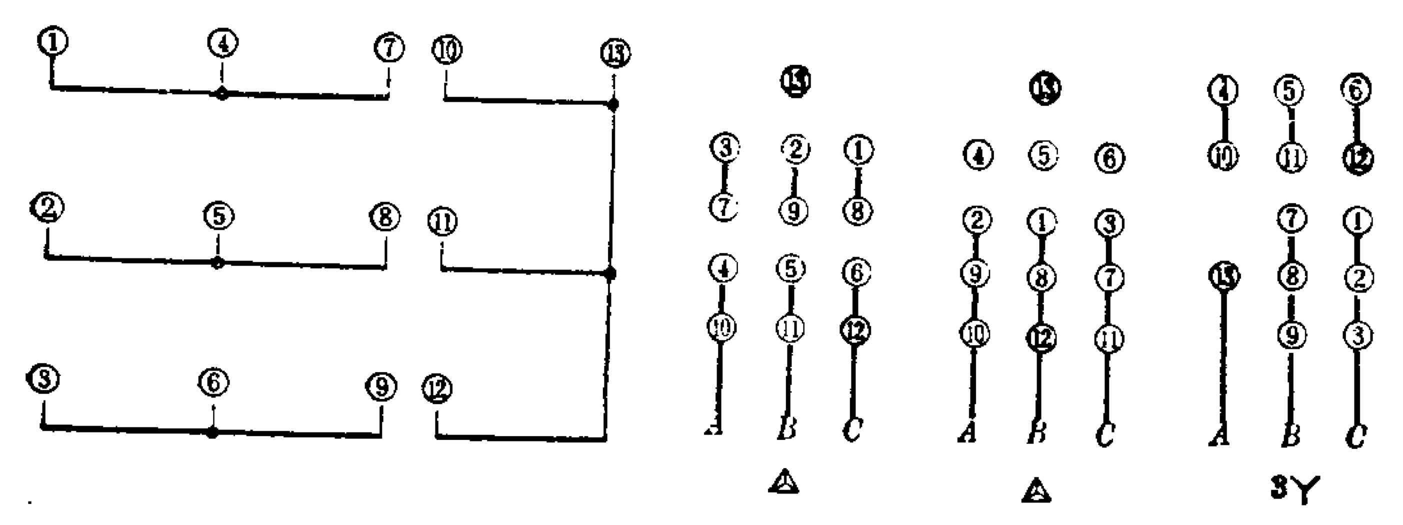


图 7-26　三速电动机的 △/△/3Y 接法

通引出线 4、10, 5、11, 6、12, 引出线 3、7, 2、9, 1、8 分别短接, 引出线 13 空接时, 电动机绕组接成第一种 △ 联接; 当电源 A、B、C 分别接通引出线 2、9、10, 1、8、12, 3、7、11, 引出线 4、5、6、13 空接时, 电动机绕组接成第二种 △ 联接; 当电源 A、B、C 分别接通引出线 13, 7、8、9, 1、2、3, 引出线 4、10, 5、11, 6、12 分别短接时, 电动机绕组接成 3Y 联接。

这种 △/△/3Y 接法的三速电动机也可用开关和交流接触器组合两种方法控制。

(1) 开关控制

用 LW5 万能转换开关改装后控制, 开关接线及各位置接点通断情况见图 7-27, 开关操作如下:

转换开关拨到左边 45° 位置时, 接点 3～4、5～6、7～8、11～12、13～14、17～18、29～30、31～32、33～34 接通, 电源 A、B、C 分别接通引出线 4、10, 5、11, 6、12, 引出线 3、7, 2、9, 1、8 分别短接, 引出线 13 空接, 电动机绕组接成第一种 △ 联接。

转换开关拨到右边 45° 位置时, 接点 5～6、7～8、9～10、23～24、25～26、27～28、37～38、39～40、41～42 接通, 电源 A、B、C 分别接通引出线 2、9、10, 1、8、12, 3、7、11, 引出线 4、5、6、13 空接, 电动机绕组接成第二种 △ 联接。

(a)

位置	Z(左)	0	Y(右)			位置	Z(左)	0	Y(右)		
	45°		45°	90°	135°		45°		45°	90°	135°
作用	△	停	△	停	3Y	作用	△	停	△	停	3Y
接点 1~2					×	接点 23~24			×		
3~4	×				×	25~26			×		×
5~6	×		×			27~28			×		
7~8	×		×			29~30	×				×
9~10			×			31~32	×				
11~12	×				×	33~34	×				
13~14	×					35~36					×
15~16					×	37~38			×		×
17~18	×					39~40			×		
19~20						41~42			×		
21~22					×	43~44					×

(b)

图 7-27 △/△/3Y 接法的控制开关接线图

转换开关拨到右边135°位置时，接点1～2、3～4、11～12、15～16、21～22、25～26、29～30、35～36、37～38、43～44接通，电源A、B、C分别接通引出线13，7、8、9，1、2、3，引出线4、10，5、11，6、12分别短接，电动机绕组接成3Y联接。

这个开关控制电路在三种接法时相序相同，可以用于同转向绕组方案。

(2) 交流接触器、按钮控制

控制电路见图7-28，电路操作如下：

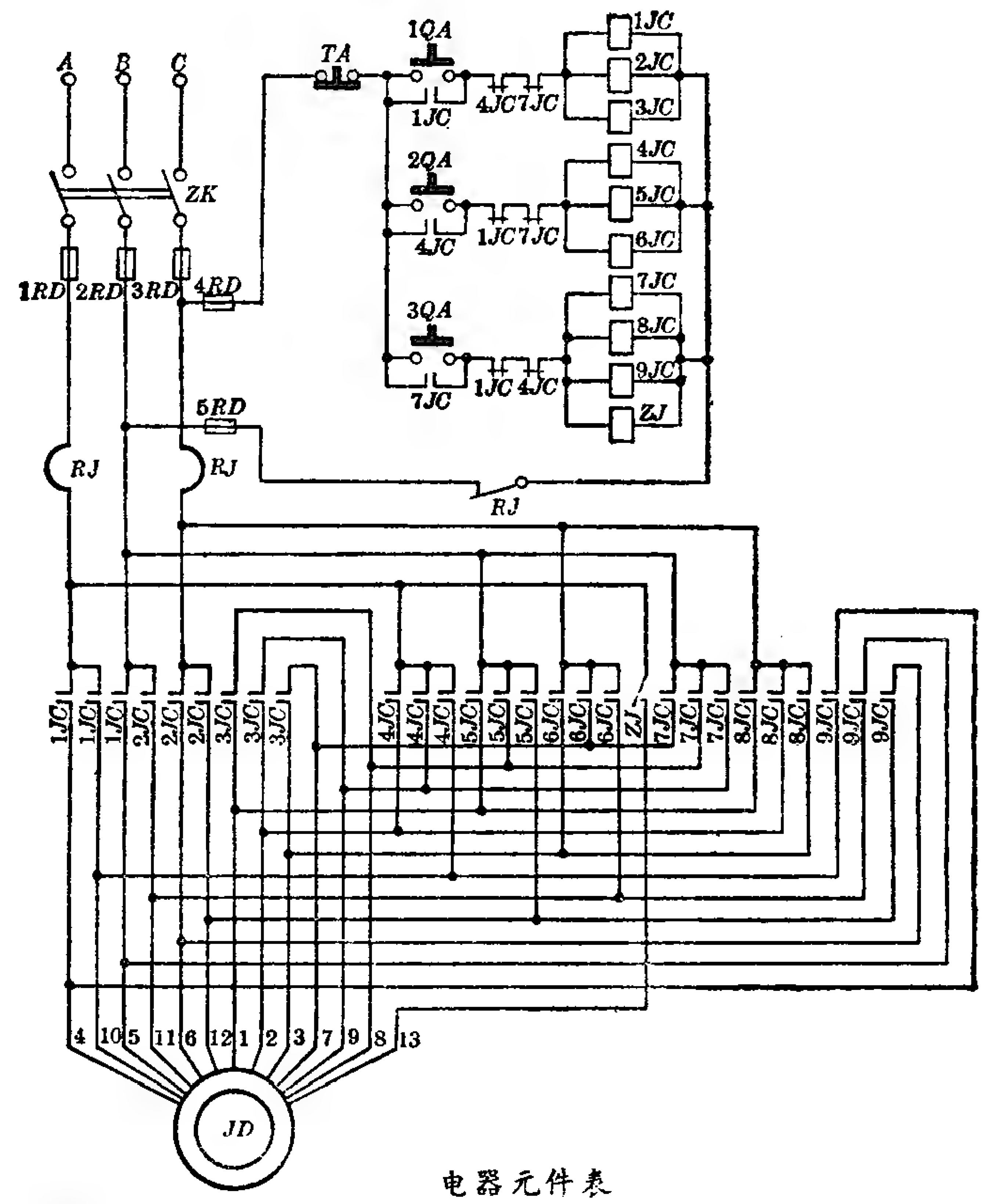
接通主令开关ZK，揿动按钮$1QA$时，$1JC$、$2JC$、$3JC$触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线4、10，5、11，6、12，引出线3、7，2、9，1、8分别短接，引出线13空接，电动机绕组接成第一种△联接。

揿动停止按钮TA，再揿动按钮$2QA$时，$4JC$、$5JC$、$6JC$触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线2、9、10，1、8、12，3、7、11，引出线4、5、6、13空接，电动机绕组接成第二种△联接。

揿动停止按钮TA，再揿动按钮$3QA$时，$7JC$、$8JC$、$9JC$、ZJ触头闭合，电源A、B、C分别接通引出线13，7、8、9，1、2、3，引出线4、10，5、11，6、12分别短接，电动机绕组接成3Y联接。

这种控制电路同样须先停车后再变速。如果用双向控制按钮和交流接触器等组合控制，电动机可直接变换转速。控制电路见图7-19。

综上所述，凡是使用改装的LW5万能转换开关时，要注意这种开关的额定电流是15安，额定电压500伏。它只能控制较小容量的多速电动机(一般在5.5千瓦以下)。如果使用场合要求电动机频繁起动，那末开关容量还要适当降低。对



电器元件表

	符号	名称	数量		符号	名称	数量
1	ZK	主令开关	1	8	5JC	交流接触器	1
2	1RD～5RD	熔断器	5	9	6JC	交流接触器	1
3	TA 1QA 2QA 3QA	按钮	4	10	7JC	交流接触器	1
				11	8JC	交流接触器	1
				12	9JC	交流接触器	1
4	1JC	交流接触器	1	13	ZJ	中间继电器	1
5	2JC	交流接触器	1	14	RJ	热继电器	1
6	3JC	交流接触器	1	15	JD	三速电动机	1
7	4JC	交流接触器	1				

图 7-28 △/△/3Y 接法的接触器控制接线图

于较大容量的多速电动机，可用交流接触器组合控制。交流接触器触点电流选择视电动机额定功率而定。

用交流接触器控制的各电路，在安装之前要把所用的各只交流接触器包括中间继电器都进行一次清洁处理，尤其是触点、衔铁一定要保持干净，不能有油污。根据实践经验，这样做可以避免意外的短路。同时要注意，在同一电路中要用同一型号的交流接触器和中间继电器，以保证它们具有相同的性能。对交流接触器控制的电路，日常也要加强维护保养。

单绕组多速电动机的控制有着多种形式和接法，以上介绍仅属初步，读者在实际应用时应根据具体情况具体分析，灵活地加以应用。

第八章 谐波磁场的影响及其克服方法

单速异步电动机改绕多速，在运转试验时可能会遇到以下现象：

1）低速“潜行”，即电动机起动后始终停留在较低的速度上运转，不能加速到正常的额定转速；

2）发生“死点”，即转子处于某些位置时电动机起动不出；

3）起动或运转时发生强烈噪声。

以上现象将使改绕后的单绕组多速电动机不能使用。“**现象是本质的表现**”，根据分析，以上现象的发生都是由它们的共同本质——异步电动机中谐波磁场的影响造成的。

谐波磁场这个概念我们在第三章中曾经简单地提到过。我们当然希望异步电动机中只产生与电机极数相同的基波磁场。但是正如伟大领袖毛主席指出的：“**没有什么事物是不包含矛盾的，没有矛盾就没有世界。**”谐波磁场的存在正是电机内部矛盾性的反映。这个矛盾在一定的条件下会比较突出，从而对电机性能造成严重影响。为了找出解决矛盾的方法，就必须对它进行一定的分析。

应该说明，异步电动机的谐波磁场及其影响是一个比较复杂的问题，要深入地分析这个问题，需要较深的数学和基础

知识。因此本章的讨论只是对这一问题作一些基本的分析，并且主要是定性的而不是定量的。

第一节 谐波磁场的产生

异步电动机中谐波磁场的产生，主要是由于以下两方面的原因。

1）绕组磁势曲线不是正弦波形；

2）空气隙是齿形构造，不是光滑、均匀的。

下面分别进行分析。

1. 由于定子绕组磁势曲线为非正弦波而产生的谐波磁场

第三章末节我们曾经画过定子绕组磁势曲线，知道磁势沿气隙圆周的分布并不是正弦形，而是阶梯形。并且说明过一个矩形波实际上是由基波（频率和原波形相等）和许多谐波共同组成的。

阶梯形的定子绕组磁势曲线可以看成是许多不同的矩形波的迭加。既然矩形波是由基波和许多次谐波所组成，因此阶梯波也必然是由基波和许多次谐波所组成。阶梯波中的基波，其频率和绕组磁势曲线本身频率相等，因而基波极数就等于电动机极数，它的幅值最大并产生电动机的主磁场。基波以外的各次谐波，其频率为基波的整倍数，因而其磁场极数也为主磁场的整倍数。

单个矩形波，其谐波次数为三、五、七、九……奇数次。然而，单绕组多速电动机绕组磁势曲线的波形常具有不同的情形，它可能既含有三、五、七、九……奇次谐波，又含有二、四、六、八……偶次谐波，第二节中将对此再作分析。

2. 由于气隙的齿形构造而产生的谐波磁场

异步电动机定子铁心是开有槽、齿的，因而沿圆周空气隙是齿形构造而不是光滑、均匀的。以前我们在画绕组磁势曲线时并没有考虑到这个因素，实际上是把铁心看作具有圆柱形的光滑平面。

大家知道，铁和空气两者导磁能力有很大差别。因此当空气隙是齿形构造时，转子和定子之间对着齿的部分，其导磁能力比对着槽的部分要强得多。观察图 8-1（图中假定转子铁心为光滑平面），如果定子铁心没有槽和齿，电动机气隙主磁场波形将如曲线 *1* 所示，为正弦形。实际上由于齿和槽两者导磁能力的差别，主磁场波形将变成曲线 *2*（阴影部分）所示的波形。曲线 *2* 实际上是由曲线 *1* 和曲线 *3* 两者合成的。曲线 *3* 是一个幅值变化着的（变化规律也为正弦波）正弦波，振幅变化的最大值和零值分别和曲线 *1* 的最大值和零值重合。曲线 *3* 的频率比曲线 *1* 高得多，仔细观察它的波形可以看到，每隔一个齿距它就变化一周，因此它在电动机全圆周上的变化周数就等于定子铁心的槽数 z_1。

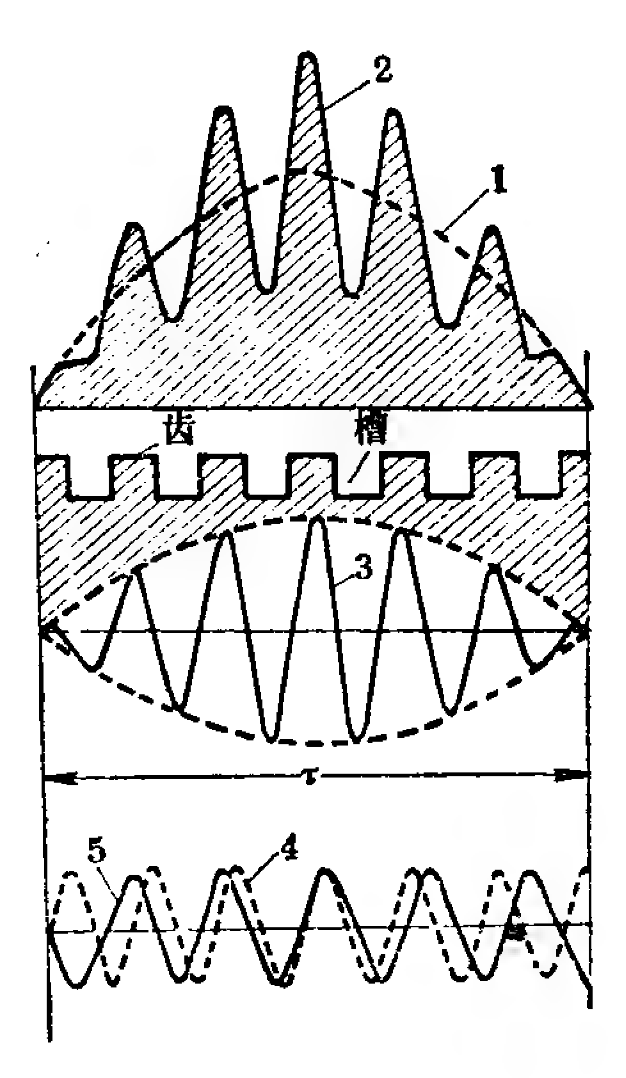


图 8-1　齿谐波磁场

我们知道基波磁场在气隙全圆周上的变化周数等于电动机的极对数 p。曲线 *3* 的周数恰好是基波的 $\frac{z_1}{p}$ 倍，因此曲线

3 的频率也恰好是基波的 $\frac{z_1}{p}$ 倍。

理论分析证明：象曲线 3 那样的，振幅按正弦规律（正弦规律的周数和基波相等，等于 p）变化的正弦波，又可以分解成如图 8-1 中曲线 4、5 两个等幅的正弦波。其中曲线 4 在气隙全圆周上的周数等于 z_1+p，因而其频率为基波的 $\left(\frac{z_1}{p}+1\right)$ 倍；曲线 5 在气隙全圆周上的周数等于 z_1-p，因而其频率为基波的 $\left(\frac{z_1}{p}-1\right)$ 倍。如果把曲线 1 看作基波，曲线 4 和曲线 5 就可以看作是 $\left(\frac{z_1}{p}+1\right)$ 次和 $\left(\frac{z_1}{p}-1\right)$ 次谐波。

归纳以上分析，结论是：由于空气隙的齿形构造，绕组基波磁场将产生次数为 $\left(\frac{z_1}{p}\pm 1\right)$ 的一对谐波磁场。这种由于空气隙的齿形构造而产生的谐波磁场叫做"齿谐波磁场"，其谐波次数相对较高。

齿谐波磁场次数虽然较高，但却是高次谐波中最严重的谐波，因此必须予以特别注意。

当然，绕组基波磁场会产生一对齿谐波磁场，绕组谐波磁场也同样会产生齿谐波磁场。不过，由于绕组谐波磁场比基波磁场小得多，它产生的齿谐波磁场在实用上已可以忽略。

3．转子方面的谐波磁场

前面分析的都是定子方面的谐波磁场，实际上转子方面也同样会产生谐波磁场。因为定子绕组磁势曲线中每一个波，不论是基波还是任意一次谐波，都会在转子绕组中感应出一个与它同次的交变电流，这个电流除了产生与定子同次的交变磁场外，还会产生其余不同次的高次谐波磁场。

根据理论分析，如定子绕组谐波磁场次数为 ν'（基波可以

看成为一次谐波，即 $\nu'=1$)，则它在转子绕组中感应产生的谐波磁场次数 $\mu'=\frac{kz_2}{p}+\nu'$，其中 z_2 为转子槽数，k 为零以及任意正、负整数（一般取 $k=\pm1$ 就够了，$k=\pm2$ 以上的高次谐波已很微弱，可以忽略）。

如果转子铁心不是闭口槽，即表面也有槽和齿，那末，和定子方面同样理由，转子也会产生齿谐波磁场，其次数 $=\frac{z_2}{p}\pm1$。它的影响在高次谐波中也比较严重。

4. 谐波次数的统一

大家知道，电动机的极数有不同的数值。换句话说，不同极数的电动机，基波磁场的极数也不同。这就会带来一个问题，即同一次谐波磁场对于不同的电动机将有不同的极数。

例如一只两极电动机，其基波磁场为两极；二次谐波磁场为四极；三次谐波磁场为六极……。一只四极电动机，其基波磁场为四极；二次谐波磁场为八极；三次谐波磁场为十二极……。同是二次谐波，一个极数为四，一个极数为八。这样，分析时就很不方便，甚至会造成混乱。因此，有必要把谐波次数统一起来。

为此目的，我们规定：不论电动机基波极数多少，都以两极波为基准，规定为 1 次波。四、六、八、十……极波依次规定为 2、3、4、5……次波。如果电动机是一只四极电动机，我们就说该电动机的基波是 2 次波，它的二次（“二”是相对于该电动机基波而言。为不致混淆，本书都用中文数字二、三、四、……表示；用阿拉伯数字表示的次数都是以两极波为基准的统一次数）谐波是 4 次波，三次谐波是 6 次波，依次类推。

经过这样统一后，不论电动机基波极数如何，同一次谐波磁场的极数就一致了——1 次波为两极，2 次波为四极，3 次

波为六极………,也就是:

$$谐波磁场极数=谐波次数\times 2$$

另外,也可以明显地看到:

$$统一后谐波次数=统一前谐波次数\times p$$

我们以符号 ν 代表统一后定子谐波次数,符号 μ 代表统一后转子谐波次数,显然:

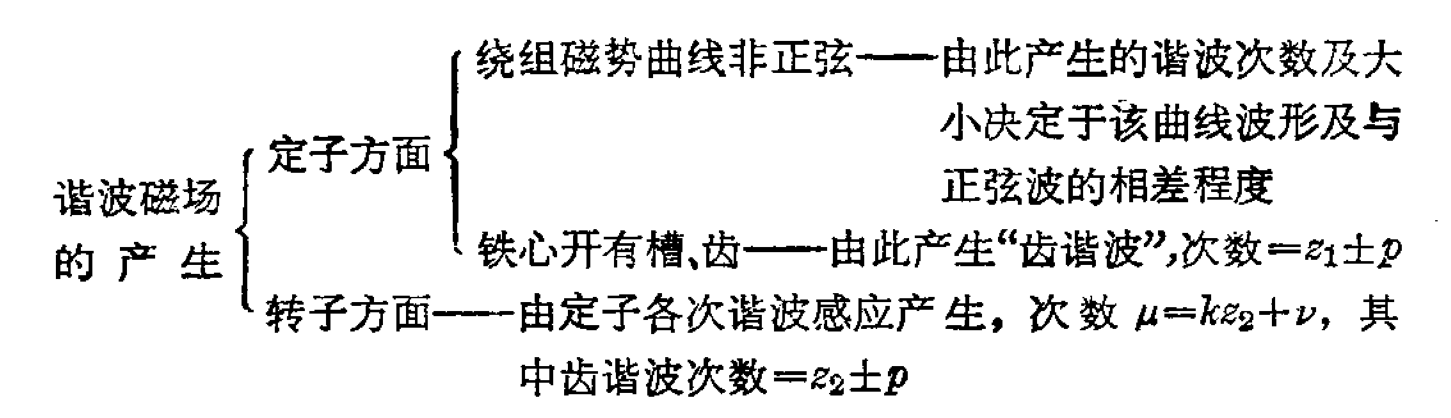
$$\nu=p\nu'$$

$$\mu=p\mu'=kz_2+\nu$$

其中定子齿谐波次数为 $z_1\pm p$,转子齿谐波次数为 $z_2\pm p$(定子齿谐波中 z_1+p 次的磁场旋转方向和基波相同,符号为"+";z_1-p 次齿谐波磁场旋转方向和基波相反,符号为"-"。因此,如果考虑齿谐波磁场的转向,即考虑其"+"、"-"号,则定子齿谐波次数应为 $\pm z_1+p$。同理,转子齿谐波次数应为 $\pm z_2+p$)。

本章以后所说的谐波次数均为统一次数。

5. 小结



以一只定子 36 槽,转子 34 槽的四极电动机为例。假定它的绕组是正规 60° 相带绕组。第二节中将说明这种绕组的磁势曲线除基波(2 次波)外,还含有五、七、十一、十三、十七、十九等次谐波(其中七、十三、十九……次与基波磁场转向相同,五、十一、十七……次与基波磁场转向相反)。按统一次

数，该绕组磁势中即含有 2、10、14、22、26、34、38…… 次波。另外可算得定子绕组齿谐波次数$=z_1\pm p=36\pm 2$、即 38 次和 34 次。由此，就可排出该电动机的定、转子谐波谱如表 8-1（定子谐波次数排至齿谐波为止）：

36/34 槽四极电动机定、转子谐波谱　　表 8-1

定子谐波次数 ν	转子谐波次数 μ		
	$k=0$	$k=1$	$k=-1$
2	2	36	−32
−10	−10	24	−44
14	14	48	−20
−22	−22	12	−56
26	26	60	−8
−34	−34	0	−68
38	38	72	4

由此看来，异步电动机中谐波磁场是很多的。粗想起来，既然很多，它的影响好象会很大了。但实际并非如此，对一个周期性的非正弦波来说，它的谐波幅值是随着次数的增高成反比地减小的。因此实际有影响的谐波次数是有限的，高于一定次数的谐波，其幅值已小到可以忽略它的存在。不过，对于不同形状（周期相等）的非正弦波，可以忽略的谐波次数是不同的（这里不考虑电动机中的特殊情况——齿谐波），或者说同次谐波的幅值是不同的。一般说，非正弦波波形与正弦形相差愈大，谐波就愈丰富。“丰富”的意思是指：1）所含谐波次数愈多；2）同次谐波幅值愈大，或者说可以忽略的谐波次数愈高。

第二节　不同绕组的谐波磁场

异步电动机中究竟存在哪些谐波磁场以及它的强弱情况，和定子绕组的磁势曲线有极大关系。不同的绕组情况有着不同的磁势曲线，因而也就有不同的谐波磁场。下面作一些初步分析。

1．60° 相带绕组的谐波磁场

60° 相带绕组就是第四章中所称的正规分布典型绕组。这种绕组，其相绕组中每一段所含的全部矢量所占的电角度等于 60°，因此叫做 60° 相带绕组。单速的整数槽（q＝整数）三相绕组通常都是 60° 相带绕组。

图 8-2 和图 8-3 分别画出了 24 槽两极和 36 槽四极的 60° 相带绕组磁势曲线。由图看出，这种磁势曲线的特点是：两个半波组成一个周期，并且一个周期中两个半波波形完全一样，只差一个负号（即极性相反）。这种波形特点用一句话来说就是“对称于横轴”。在通用的各种绕组中，60° 相带绕组磁势曲线和正弦形比较接近，因此它的谐波比较少，对电动机性能影响也比较小。正由于这一点，所以单速异步电动机和倍极比为 2:1 的双速异步电动机基准极几乎无例外地都采用这种绕组。

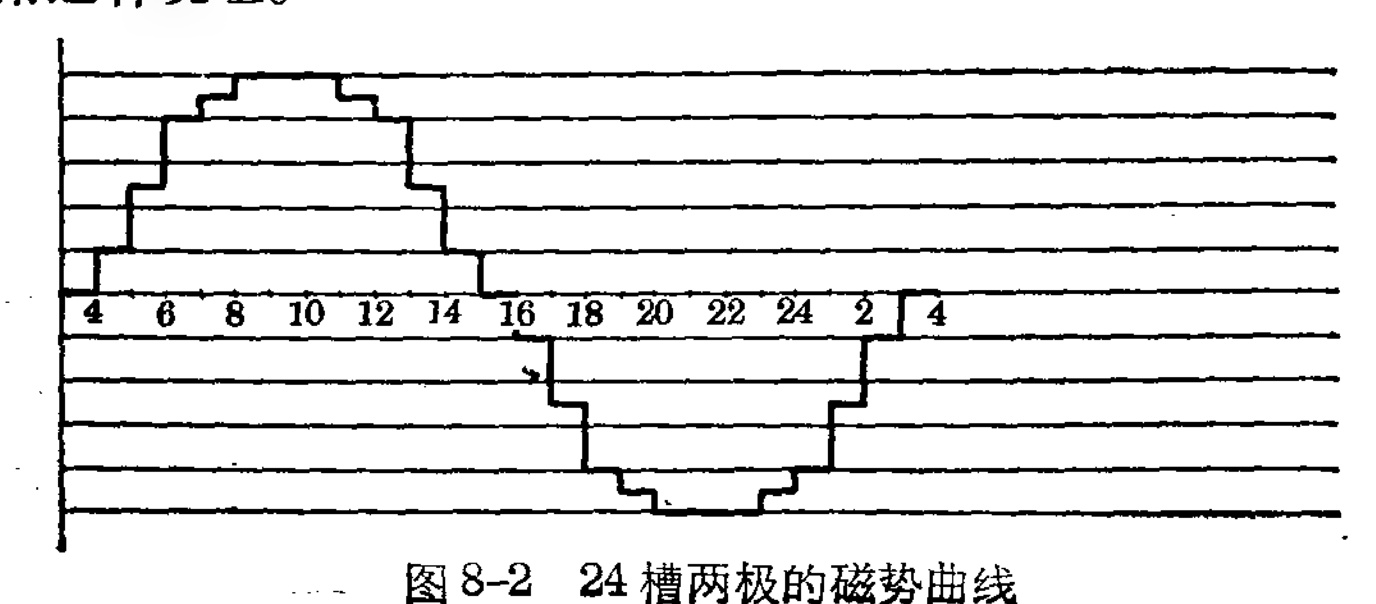


图 8-2　24 槽两极的磁势曲线

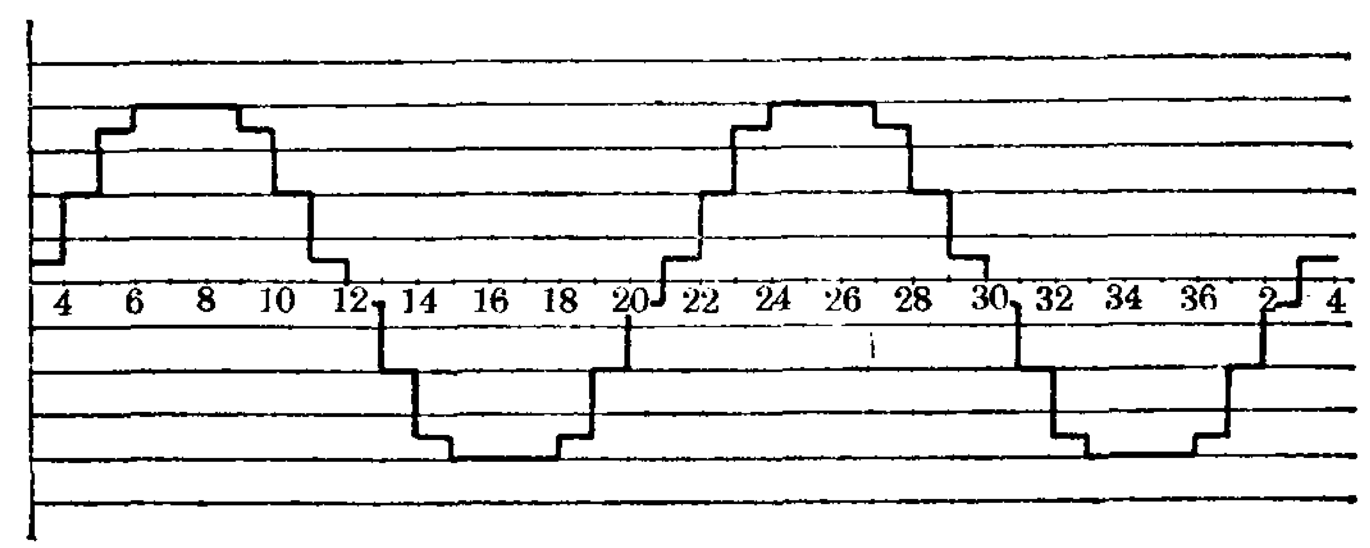


图 8-3　36 槽四极的磁势曲线

根据电工学理论分析：凡对称于横轴的周期性非正弦波，只含一（即基波）三、五、七、九等奇次谐波，二、四、六、八、十等偶次谐波幅值均等于零。另外，理论分析还证明：三相电动机里，在三相对称条件下（此条件在异步电动机中一般都具备），三次及其倍数次谐波即三、六、九、十二、十五、十八、二十一等次谐波都等于零。

因此，60° 相带绕组除基波外，所含谐波只有五、七、十一、十三、十七、十九等次。

2．庶极接法 120° 相带绕组的谐波磁场

相绕组每一段所占电角度等于 120° 的绕组叫做 120° 相带绕组。图 8-4 和图 8-5 分别画出了采用庶极接法的 36 槽八极和 24 槽四极 120° 相带绕组槽矢量图。图 8-6 和图 8-7

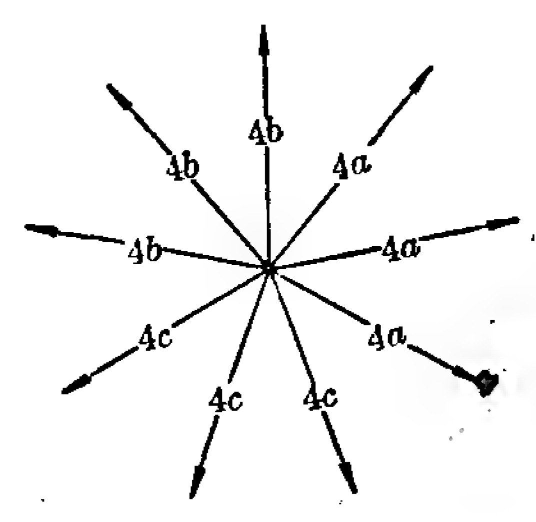


图 8-4　庶极接法 120° 相带槽矢量图（36 槽八极）

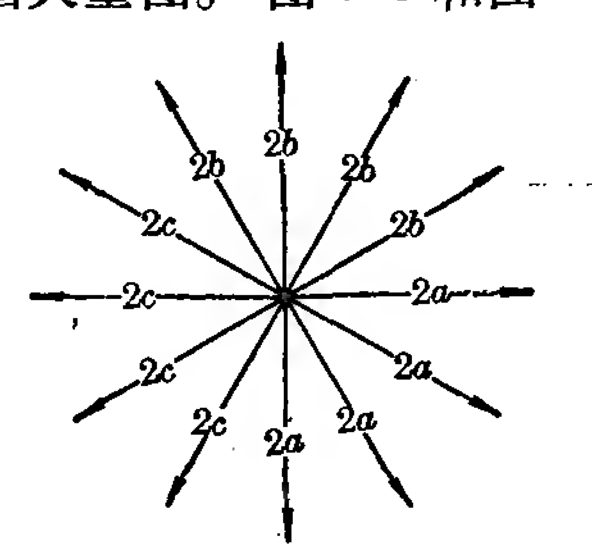


图 8-5　庶极接法 120° 相带槽矢量图（24 槽四极）

36 槽八极槽电流表(跨距 1—6)

槽 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓	
$i_B=\frac{1}{2}$			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑
$i_合$	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$

槽 号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓	
$i_B=\frac{1}{2}$			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑
$i_合$	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$

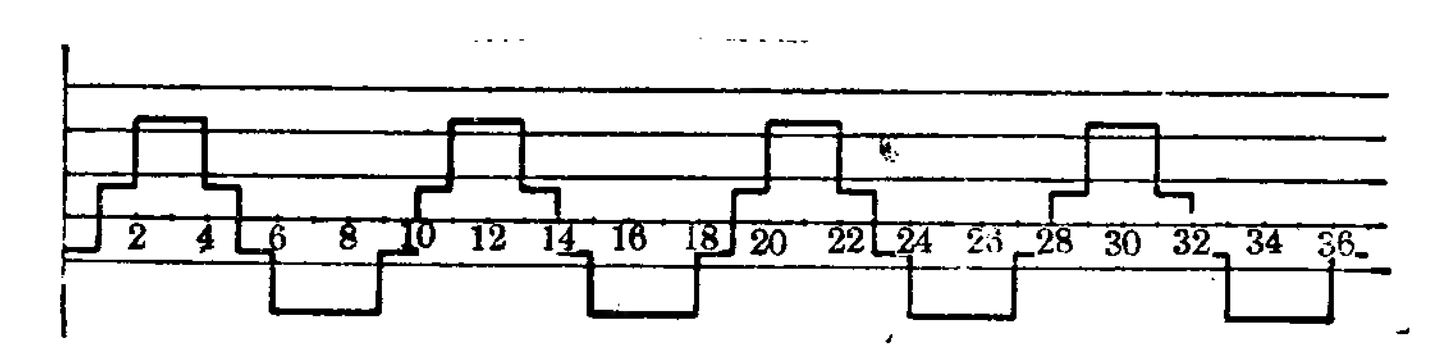


图 8-6　图 8-4 绕组的槽电流和磁势曲线

24 槽四极槽电流表(跨距 1—8)

槽号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑	↑				↓	↓	↓	↓	
$i_B=\frac{1}{2}$				↓	↓	↓	↓		↑	↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑	↑		↓	↓	↓	↓				↑
$i_合$	↑	↑	↑		↓	↓	↓	↓				↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	0	$1\frac{1}{2}$
槽号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑	↑				↓	↓	↓	↓	
$i_B=\frac{1}{2}$				↓	↓	↓	↓		↑	↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑	↑		↓	↓	↓	↓				↑
$i_合$	↑	↑	↑		↓	↓	↓	↓				↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	0	$1\frac{1}{2}$

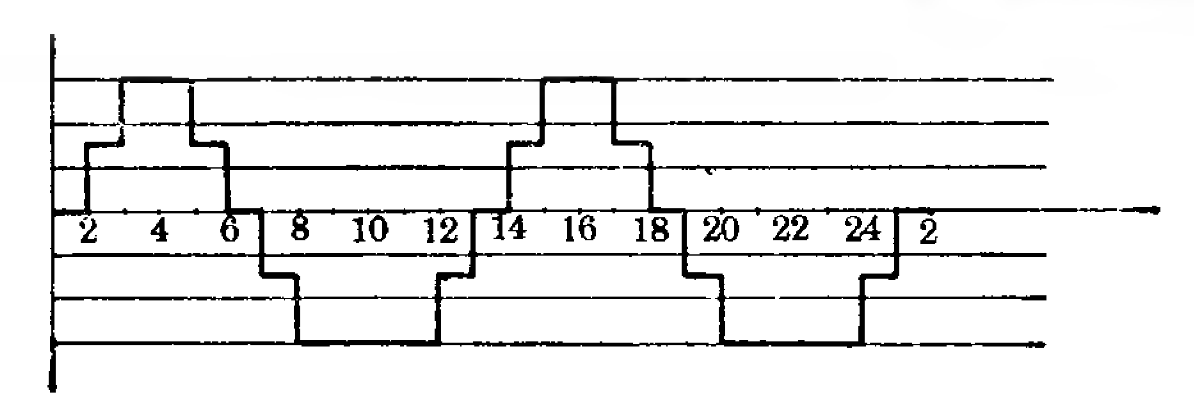


图 8-7　图 8-5 绕组的槽电流和磁势曲线

24 槽 4 极槽电流表(跨距 1—7)

槽　　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑	↑			↓	↓	↓	↓		
$i_B=\frac{1}{2}$			↓	↓	↓	↓			↑	↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑			↓	↓	↓	↓			↑	↑
$i_合$	↑	↑			↓	↓	↓	↓			↑	↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$
槽　　号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑	↑			↓	↓	↓	↓		
$i_B=\frac{1}{2}$			↓	↓	↓	↓			↑	↑	↑	↑
$i_C=-1$	↑	↑			↓	↓	↓	↓			↑	↑
$i_合$	↑	↑			↓	↓	↓	↓			↑	↑
	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$

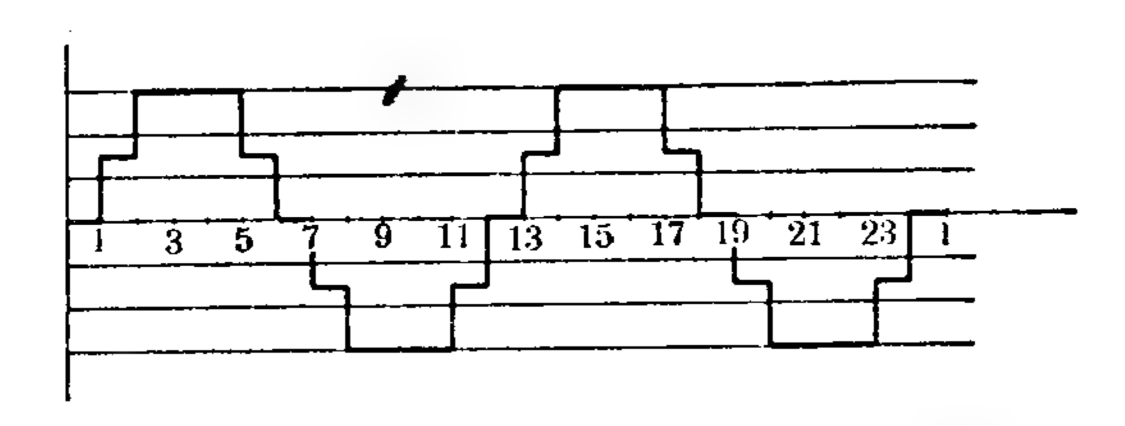


图 8-8　24 槽四极 120° 相带绕组的槽电流和磁势曲线

是它们的槽电流表和磁势曲线。仔细观察曲线形状可知，这种非正弦波都具有一定周期，图 8-6 波形周期为 9 个槽(这说明基波为 4 次——八极)，图 8-7 波形周期为 12 个槽(这说明基波为 2 次——四极)。一个周期内两个半波波形都不相同。因此这种非正弦波属于"横轴不对称波"，与正弦形的差别较图 8-2 和图 8-3 的横轴对称波大，所含谐波也较图 8-2 和图 8-3 曲线多。根据电工学理论分析，横轴不对称的周期性非正弦波，除含奇次谐波外还含有偶次谐波。因此这种 120° 相带绕组磁势曲线除基波外，尚含有二、四、五、七、八、十、十一、十三……次谐波(在三相对称条件下三次及其倍数次谐波仍为零)，例如图 8-6，基波为 4 次，谐波为 8、16、20、28、32、40……次(统一次数)。

在采用满距情况下，庶极接法 120° 相带绕组的磁势曲线和 60° 相带绕组磁势曲线将会变得一致。图 8-8 就是 24 槽四极、庶极接法 120° 相带绕组，采用 1—7 满距时槽电流表和磁势曲线，由图看出，它是一个横轴对称波，和 60° 相带绕组磁势曲线一致(下面将会看到，偶次谐波消失的原因是：采用满距后，偶次谐波的短距系数等于零)。

另外，还可以指出，非庶极接法的正规分数槽绕组，其磁势曲线有时和庶极接法 120° 相带绕组磁势曲线也相似，因而所含谐波情况也相同。图 8-9 是一个 36 槽八极，正规分数槽绕组的槽矢量图以及磁势曲线。比较图 8-9 和图 8-6 即可得出此结论。由此可知：正规分数槽绕组磁势曲线波形比正规整数槽绕组磁势曲线波形差，所含谐波也多，所以单速异步电动机应尽量避免分数槽绕组。

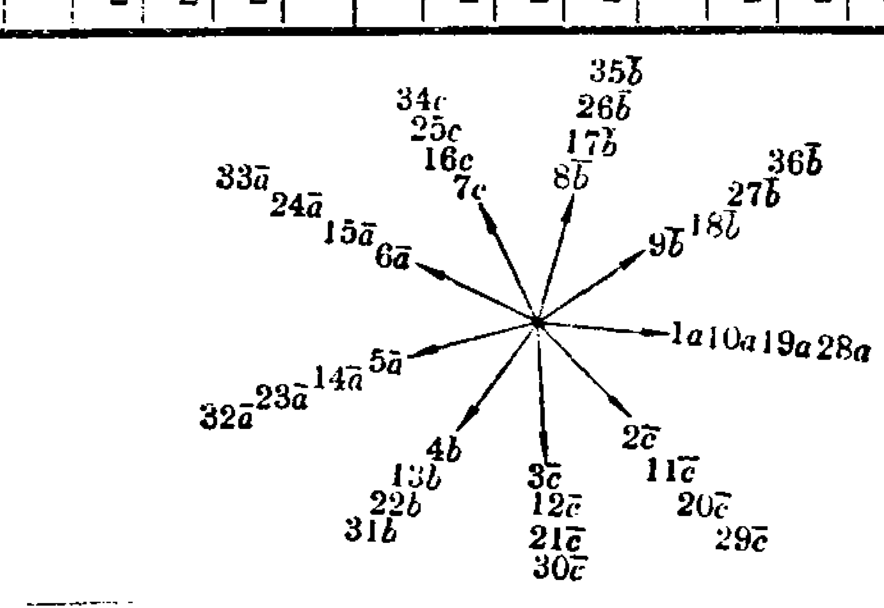
3. 其他类型绕组的谐波磁场

单绕组多速电动机所用的绕组方案，除 60° 相带和庶极

36 槽八极(正规分数槽)槽电流表(跨距 1—7)

槽　号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓		
$i_B=\frac{1}{2}$	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓
$i_C=-1$		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓
		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓
$i_合$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$

槽　号	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
$i_A=\frac{1}{2}$	↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓		
$i_B=\frac{1}{2}$	↓			↑	↑	↑		↓	↓	↓			↑	↑	↑		↓	↓
$i_C=-1$		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓
		↑	↑	↑			↓	↓	↓		↑	↑	↑			↓	↓	↓
$i_合$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	0	0	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$	$1\frac{1}{2}$



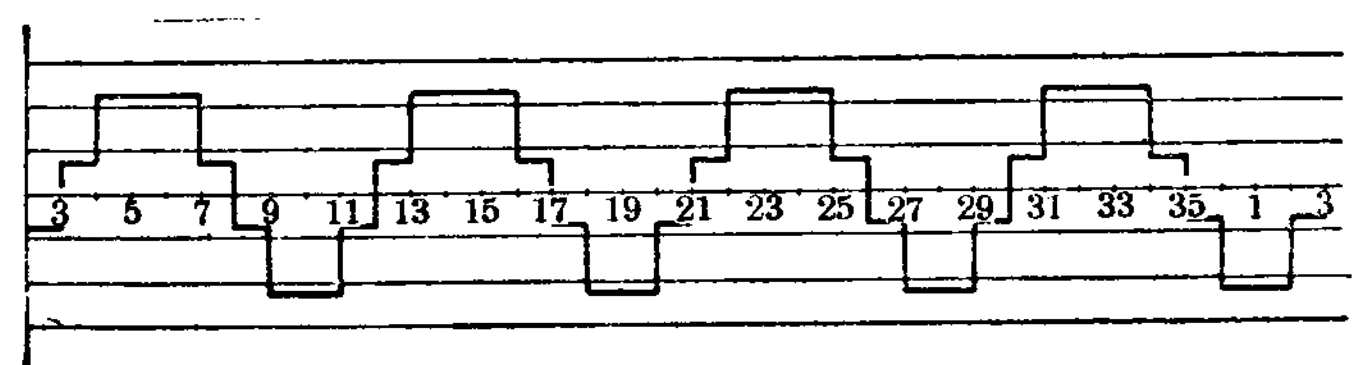


图 8-9　36 槽八极分数槽绕组的槽矢量和磁势曲线

接法120°相带绕组之外，不少情况下还用到其他类型的绕组。其中有正规分布的(例如每相矢量分布为2、2、2、2、2、2)，也有非正规分布的(例如每相矢量分布为2、4、4、2)。它们的情况不同，磁势曲线也不同。但总的说，它们的磁势曲线形状与正弦形相差程度都比60°和庶极接法120°相带绕组磁势曲线大，因此所含谐波也较60°和庶极接法120°相带绕组“丰富”，对电动机性能影响也较大，改绕时须作必要的考虑。

图8-10和图8-11画出了两个有代表性的非正常相带绕组磁势曲线及槽矢量图。图8-10的特点是：25～7槽(共18槽)的波形和7～25槽(共18槽)的波形完全相同，只差一个“负”号。因此可以认为该波形一个周期是36槽，基波是两极——1次波，此外尚含有3、5、7……奇次谐波。这里须注意，两极波所以看作基波仅仅是从波形出发而言，实际电动机

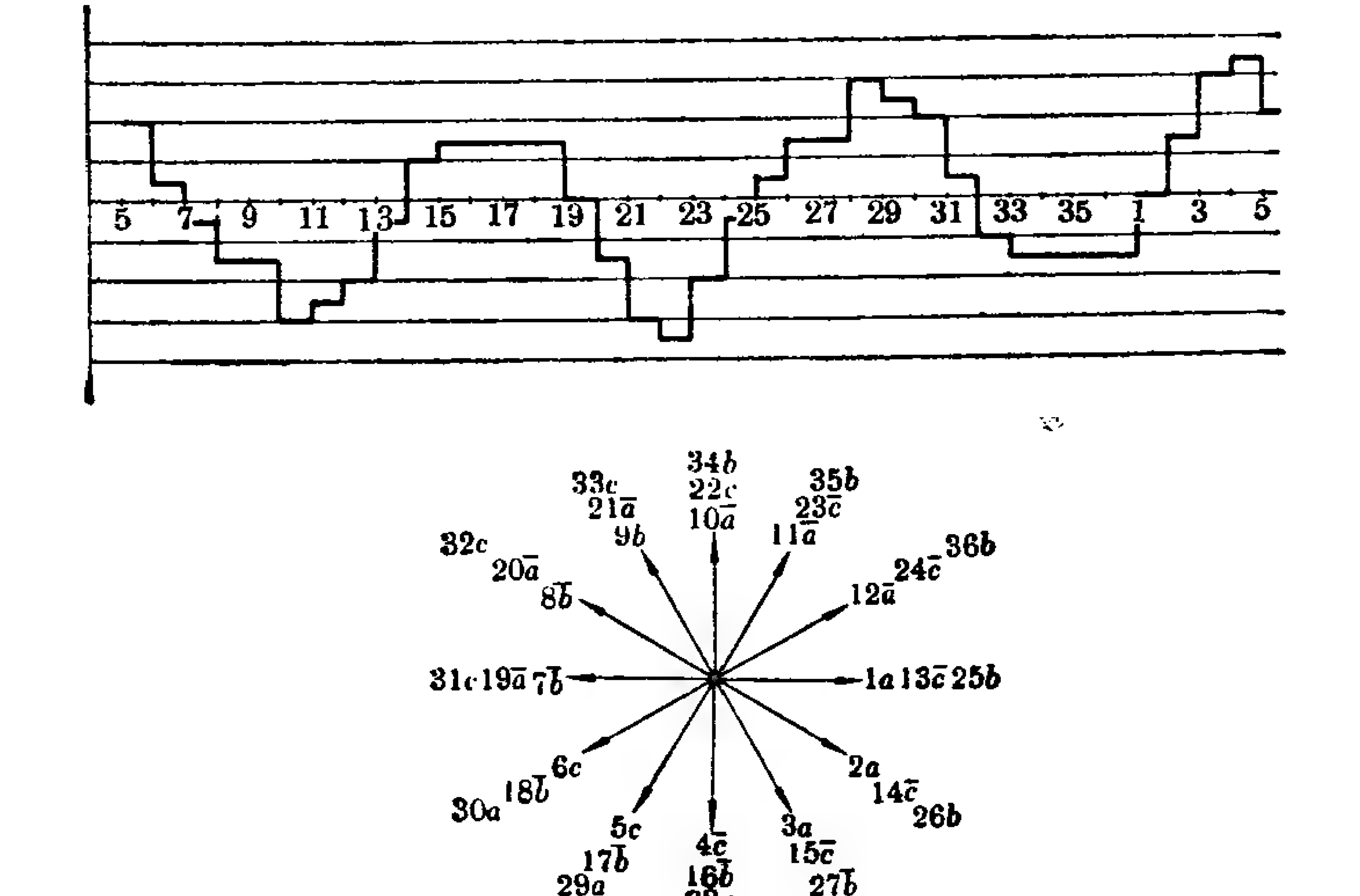
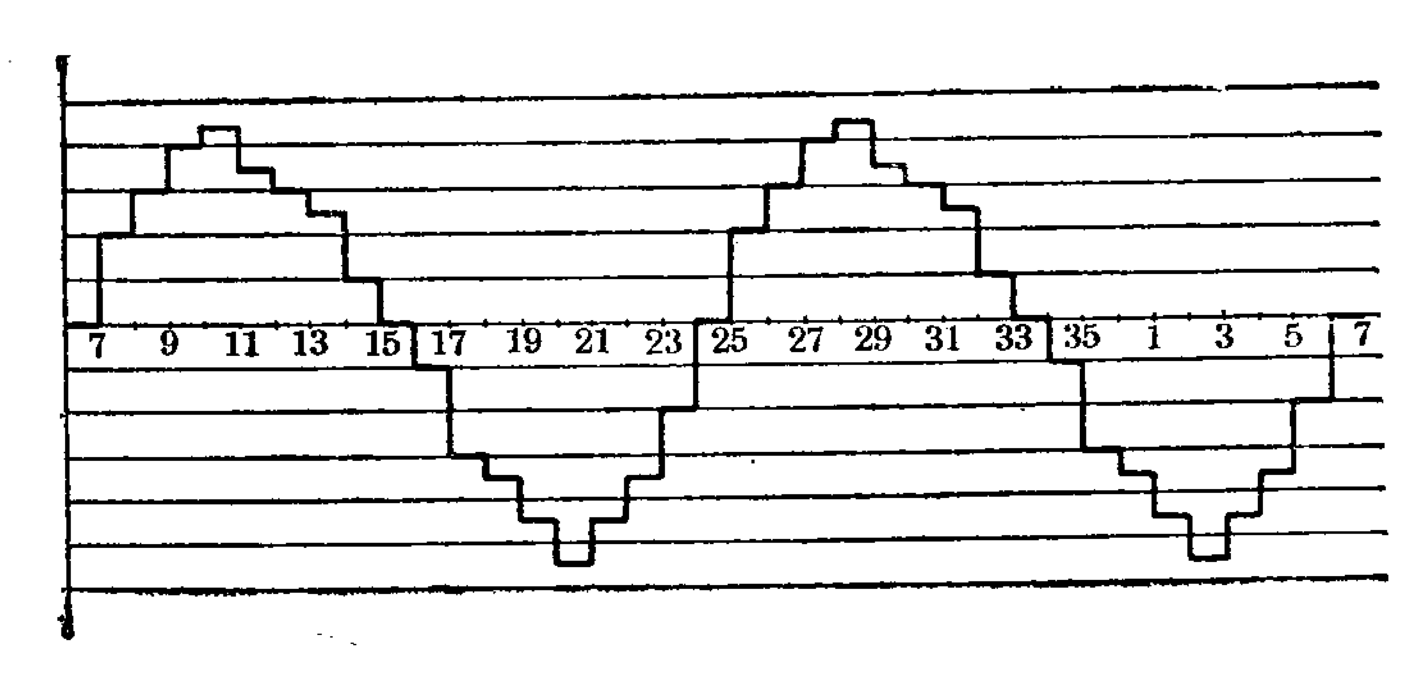


图8-10 非正常相带绕组的槽矢量图和磁势曲线



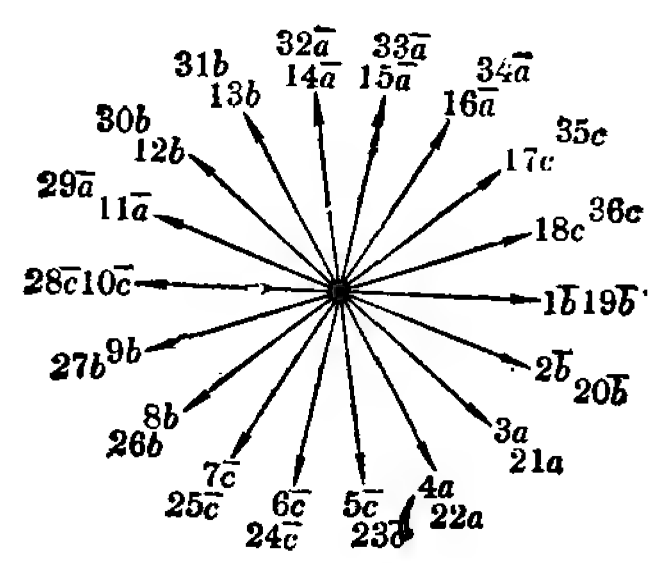


图 8-11　非正常相带绕组的槽矢量图和磁势曲线

的基波磁场仍是 3 次波即六极波磁场。

图 8-11 的特点是：一个周期占 18 槽，两半周的波形相差较大，因此其基波为 2 次波(四极)，此外奇、偶次谐波都有。

下面几节中我们将看到，对于每一个具体绕组的磁势曲线作出它的谐波分析，即得出它所含的谐波次数并计算出各次谐波的幅值是很必要的。但是要完成这项工作也是比较困难的，为了尽可能地给改绕提供一些参考，在表 8-2 中列出第九章中某些有代表性的绕组方案所含的谐波次数及其几个较强的谐波幅值，表中谐波次数均以齿谐波为限，“+”号及“−”号表示该次谐波所产生的旋转磁场的转向，“+”号表示转向和基波旋转磁场相同，“−”号表示相反。

某几种绕组(参阅第九章)的谐波次数
和较强谐波的幅值　　　　表 8-2

绕组方案	谐波次数(带○者为基波)	谐波次数	跨距 1—6 强度	跨距 1—7 强度	跨距 1—8 强度
方案 4 八极	④、-8、16、-20、28、-32、40 (-32、40 次为齿谐波)	-8	9.25%	26.6%	39.2%
		16	5.7%	8.7%	4.6%
		-32	12.5%	12.5%	12.5%
		40	10%	10%	10%
方案 10 六极	1、-1、③、5、-5、7、-7、11、-11、13、-13、-15、17、-17、19、-19、21、23、-23、25、-25、29、-29、31、-31、-33、35、-35、37、-37、39。(-33、39 次为齿谐波)	1	111%	126%	150%
		-1	21.7%	24.6%	29.4%
		5	16%	9.3%	1.7%
		-11	12.5%	6%	5.3%
		-33	9.1%	9.1%	9.1%
		39	7.7%	7.7%	7.7%
方案 11 六极	1、-1、③、5、-5、7、-7、11、-11、13、-13、-15、17、-17、19、-19、21、23、-23、25、-25、29、-29、31、-31、-33、35、-35、37、-37、39。(-33、39 次为齿谐波)	1	21.7%	24.6%	29.4%
		-1	10%	11.6%	14%
		5	22.9%	13.4%	2.4%
		-5	15.7%	9.3%	1.7%
		-7	3.2%	18%	34%
		-33	9.1%	9.1%	9.1%
		39	7.7%	7.7%	7.7%

(续表)

绕组方案	谐波次数 (带○者为基波)	谐波次数	跨距 1—7 强度	跨距 1—8 强度	跨距 1—10 强度
方案12 六极	1、−1、③、5、−5、7、−7、11、−11、13、−13、−15、17、−17、19、−19、21、23、−23、25、−25、29、−29、31、−31、−33、35、−35、37、−37、39、 (−33、39 次为齿谐波)	1	34%	40%	67.5%
		−1	24.6%	29.2%	49.3%
		−13	3.56%	7.35%	7.15%
		−33	9.1%	9.1%	9.1%
		39	7.7%	7.7%	7.7%
方案13 六极	1、−1、③、5、−5、7、−7、11、−11、13、−13、−15、17、−17、19、−19、21、23、−23、25、−25、29、−29、31、−31、−33、35、−35、37、−37、39、 (−33、39 次为齿谐波)	1	6.6%	7.85%	13.2%
		−1	11.7%	14%	23.6%
		5	3.6%	0.65%	7.25%
		−5	9.3%	1.67%	18.6%
		−7	4.85%	9.1%	9.7%
		−33	9.1%	9.1%	9.1%
		39	7.7%	7.7%	7.7%
方案12 四极	②、4、−4、8、−8、−10、12、−12、14、16、−16、20、−20、−22、24、−24、26、28、−28、32、−32、−34、38 (−34、38 次为齿谐波)	4	19.1%	13%	0
		−10	4.5%	0.84%	4.5%
		−12	0	4.1%	0
		−34	5.9%	5.9%	5.9%
		38	5.25%	5.25%	5.25%
方案13 四极	②、4、−4、8、−8、−10、12、−12、14、16、−16、20、−20、−22、24、−24、26、28、−28、32、−32、−34、38 (−34、38 次为齿谐波)	4	4.35%	3%	0
		−8	9.6%	10%	0
		−10	4.5%	0.84%	4.5%
		12	0	4.1%	0
		−34	5.9%	5.9%	5.9%
		38	5.25%	5.25%	5.25%

* 表中谐波次数均为统一次数(1 次波为两极)；强度均以基波幅度为100% 计算而得。

第三节 谐波磁场对电动机性能的影响

异步电动机中存在的谐波磁场对电动机性能会产生一定的影响，其影响的程度视情况而有不同。如果定子采用的是60°相带短矩绕组，一般说谐波磁场的影响比较小。但是，如果定子采用的是其他相带绕组，尤其是含谐波比较多的非正常相带绕组，那末谐波磁场的影响，尤其是它对电动机起动性能的影响就可能比较大。事实上，我们在改绕单绕组多速电动机时，60°以外的相带绕组以及非正常相带绕组往往是要用到的，因此了解谐波磁场对电动机性能的影响，并在此基础上找出相应的克服方法就很有必要。

谐波磁场对电动机性能的影响主要有三个方面：

1）影响起动性能；

2）产生振动噪声；

3）增加损耗，降低效率。

1．对起动性能的影响

谐波磁场对异步电动机起动性能的影响，是通过它所产生的附加转矩造成的。谐波磁场的附加转矩按其性质有异步附加转矩和同步附加转矩之分，不同性质的附加转矩影响起动性能的情况也不同。下面进行具体分析。

(1) 异步附加转矩的影响

我们已经知道，异步电动机定子绕组的基波磁场由于它的旋转特性，会使转子绕组感应出一个和它极数相同的磁场（即转子绕组基波磁场）。这两个基波磁场互相作用，就产生了使转子转动的异步转矩。所以叫做“异步转矩”，是由于转子实际转速必定低于定子基波磁场同步转速的原故。

定子绕组的谐波磁场和基波磁场一样，都是由绕组中的三相电流产生的，因此它也具有旋转特性，都能在转子绕组中感应出一个与它有相同极数的谐波磁场，并且与这个同极数的转子绕组谐波磁场相互作用产生异步转矩。这种由谐波磁场产生的异步转矩，我们把它叫做“异步附加转矩”，以和基波磁场产生的主转矩相区别。

定子绕组谐波磁场和基波磁场两者性质既有共同之处又有不同之处。就都能产生异步转矩这一点来说是共同点。**“但是，尤其重要的，成为我们认识事物的基础的东西，则是必须注意它的特殊点”**。谐波磁场性质和基波磁场性质两者不同点首先表现在不同次的谐波磁场具有不同的转向，与基波磁场转向相同的叫做“正转向”，符号为“+”；与基波磁场转向相反的叫做“负转向”，符号为“－”。（需特别指出的一点是，如果某一次谐波磁场存在有三相不对称情况，则该次谐波磁场将同时含有正、负两个转向的分量。）其次，由于谐波磁场的极数为基波磁场的整倍数，因此其同步转速必定比基波磁场同步转速低一个整倍数。如以 ν 代表定子绕组谐波磁场次数，则其同步转速 n_ν 将为：

$$n_\nu=\frac{pn_1}{\nu}$$

式中：p——基波极对数，也就是基波磁场次数；

n_1——基波同步转速。

由于谐波磁场具有不同的性质，因此它所产生的异步转矩曲线和基波转矩曲线比较也就有了不同的特点。下面分别以四极电动机（基波为 2 次）的 +4 次谐波和 －10 次谐波为例来画出它们的转矩曲线。

+4 次谐波的转向和基波磁场相同，同步转速 n_4 为：

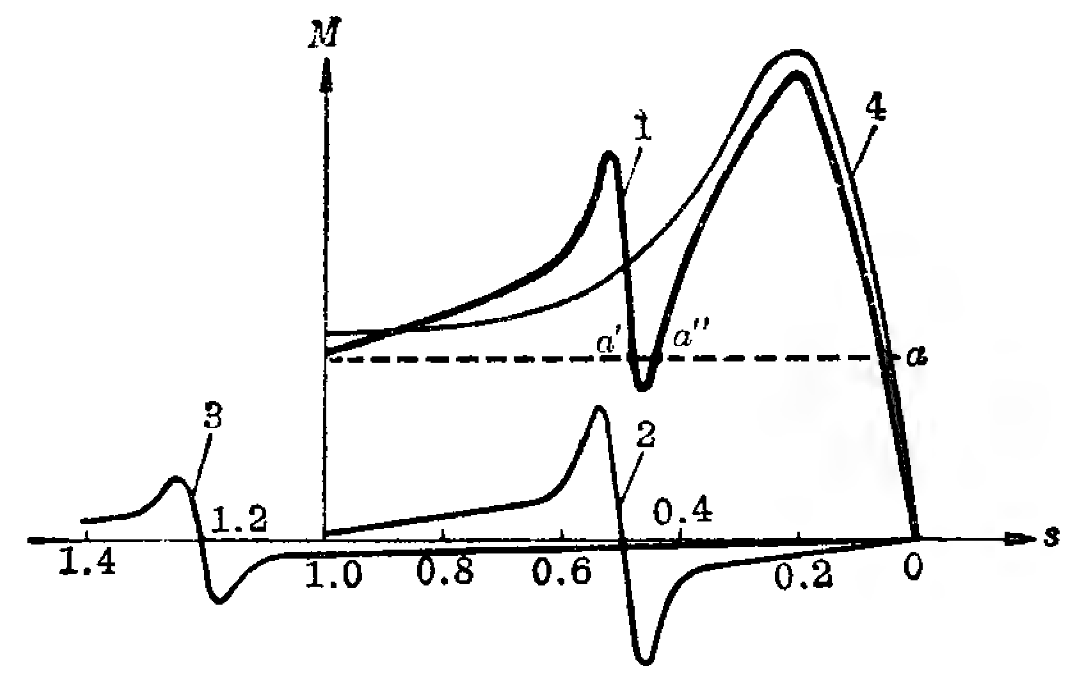


图 8-12　谐波转矩曲线

$$n_4=\frac{2}{4}n_1=\frac{n_1}{2}$$

$$n_1=\frac{60f}{p}=\frac{3000}{2}=1500\ 转/分$$

当转子转速大于零而低于 $\frac{n_1}{2}$，即 $1>s>\frac{1}{2}$ 时，+4 次谐波磁场产生的异步附加转矩显然为“正”，即与基波磁场产生的异步主转矩同方向。其曲线形状和基波转矩曲线相同，大小则取决于 +4 次谐波磁场本身幅值的大小。

当转子转速 $=\frac{n_1}{2}$ 即 $s=\frac{1}{2}$ 时，+4 次谐波磁场异步附加转矩等于零。如果转子转速高于 $\frac{n_1}{2}$ 即 $s<\frac{1}{2}$（这种情况肯定会发生。因为电动机运行时转子转速主要还是受基波磁场产生的主转矩控制，而基波磁场同步转速是大于谐波磁场同步转速的），那末对于 +4 次谐波来说，情况就起了“质”的变化。这时 +4 次谐波磁场的磁力线切割转子绕组导条的方向反了，转子绕组中感应电势和电流都改变了方向，产生的异步附加转矩也就由“正”变成了“负”。这个负转矩随转速变化的情况和正转矩曲线相似。图 8-12 曲线 *2* 即表示了 +4 次谐

波磁场的全部转矩曲线。

-10 次谐波磁场的转向和基波磁场相反，同步转速 $=-\frac{1}{5}n_1(s=1.2)$。该转矩曲线总的形状和其他曲线一样，大小也决定于谐波磁场本身的强弱。$s=1.2$ 时，转矩等于零；$s>1.2$ 时，转矩为正。转子停转时，$s=1$，由于谐波磁场转向与基波相反，转子绕组导条切割磁力线的方向也与基波相反，因此转矩为负；而且在 $s<1$ 时始终为负。-10 次谐波磁场整个转矩曲线见图 8-12 中曲线 *3*。

为了看出异步附加转矩的影响，图 8-12 中同时画出了基波磁场的转矩曲线（曲线 *4*）。定子绕组磁势既然是由基波和各次谐波合成的，因此电动机总的转矩曲线也必然是由基波转矩曲线和各次谐波转矩曲线合成。图 8-12 中曲线 *1* 就是由基波和 $+4$ 次、-10 次谐波合成的电动机总转矩曲线。

由电动机总转矩曲线就可看出异步附加转矩（曲线 *2*、*3*）的影响。正转的谐波磁场将使总转矩曲线在该次谐波同步转速附近发生凹陷，凹陷深度取决于该次谐波异步附加转矩的大小，也就是取决于该次谐波幅值的大小。图 8-12 中电动机总转矩曲线即在 $+4$ 次谐波同步转速——750 转/分（$s=0.5$）附近发生凹陷。反转的谐波磁场，其异步附加转矩在 $s<1$ 时都是负的，因此它起的作用只是降低电动机在较低转速范围内尤其是起动瞬间（$n=0$，$s=1$）的转矩，并不会使总转矩曲线发生凹陷，降低的程度也取决于反转的该次谐波幅值的大小。

电动机总转矩曲线发生的凹陷，如果达到一定深度就会对起动造成严重影响。由图 8-12 看出，电动机在负载情况下起动，如果没有谐波附加转矩影响，就能在基波主转矩作用下

逐渐加速，直至工作点 a 稳定下来。此时转速略低于基波磁场同步转速，这就是电动机的正常起动过程。如果由于异步附加转矩的影响，使总转矩曲线产生严重凹陷，以致凹陷处最低转矩低于负载转矩时，电动机在负载情况下起动，就不会稳定工作于 a 点，而只能稳定在 a' 点（电动机运转不会稳定在 a'' 点，因为总转矩曲线在该点处于上升阶段，电动机工作是不稳定的）；此时电动机转速就将停留在造成凹陷的该次谐波同步转速（图 8-12 中为 750 转/分）附近“潜行”。在极严重情况下，总转矩曲线凹陷很深，空载起动都可能会造成低速潜行。

仔细观察图 8-12 还可看出，异步附加转矩对电动机起动性能的影响，还和基波转矩本身的大小有关。谐波次数愈高，同步转速愈低，该处基波转矩也愈小，幅度相对小些的谐波磁场在该处造成的凹陷，也可能使电动机发生低速潜行，因为这时凹陷处的最低转矩也可能很低。

观察表 8-2 可看出，第九章中方案 12 的四极、跨距 1—7 和 1—8 时的 +4 次谐波，方案 10、11 的六极、跨距 1—6 时的 +5 次谐波都较强；方案 13 的四极、跨距 1—8 时的 +12 次谐波相对也较强（同步转速 250 转/分处基波转矩较小）。这些谐波都会使电动机总转矩曲线在该次谐波同步转速附近发生明显凹陷。图 8-13、图 8-14、图 8-15 分别为试验电压 135 伏时实测的该种情况下的电动机总转矩曲线。

(2) 同步附加转矩的影响

我们知道同步电动机中作用于转子上的转矩叫作“同步转矩”。所以叫作“同步转矩”，是因为在这种转矩作用下，转子的转速可以和定子绕组旋转磁场的转速达到同步的原故。

异步电动机中由于谐波磁场的作用，除了会产生异步性质的附加转矩外，同时还会产生同步性质的附加转矩，即产生

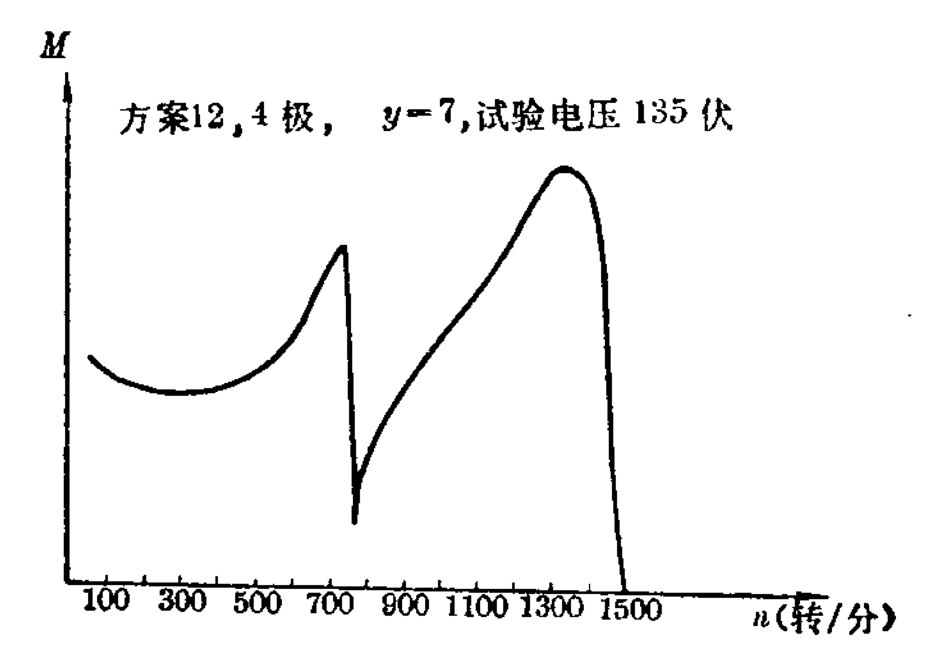
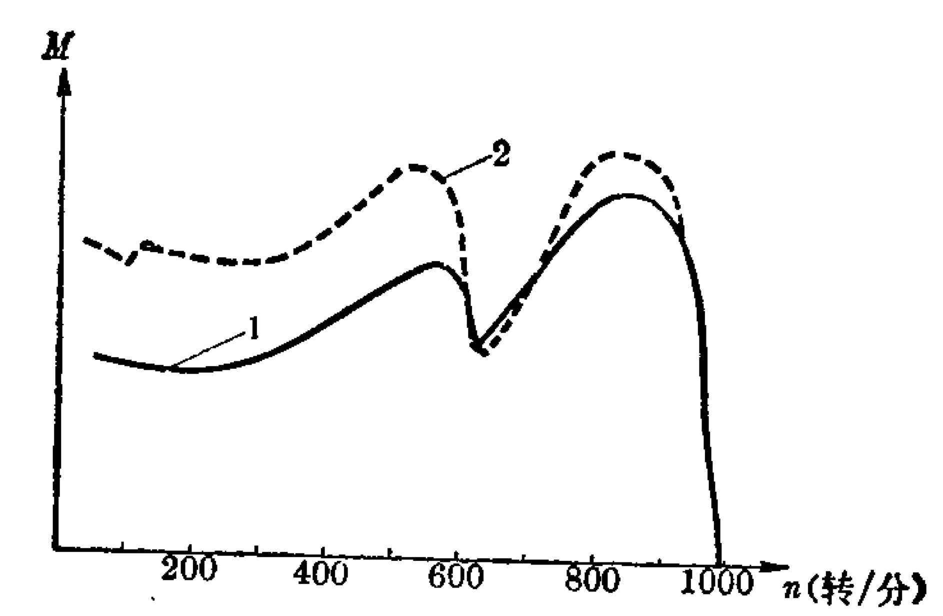


图 8-13 方案 12 在四极时的转矩曲线



曲线 1—方案 10 ⎫
曲线 2—方案 11 ⎭ 6 极，Y接法，试验电压 135 伏，y=5

图 8-14 方案 10 和 11 在六极时的转矩曲线

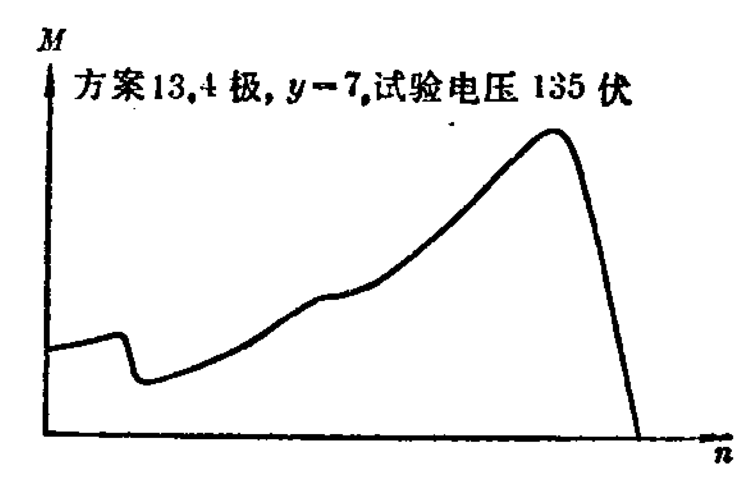


图 8-15 方案 13 在四极时的转矩曲线

"同步附加转矩"。下面就对同步附加转矩的产生及其影响进行分析。

本章第一节中已说明，定子绕组磁场中不论基波还是任意一次谐波都将在转子绕组中感应出一系列谐波，它的次数 $\mu=kz_2+\nu$，其中 z_2 为转子槽数，k 为零以及任意正负整数。如果已知某一绕组方案在某极数时的定子谐波次数，就可以利用这个公式算出转子绕组的谐波次数，并排出电动机的定、转子谐波谱。表 8-3 就是第九章方案 13 在四极时定转子谐

方案 13 的四极定转子谐波谱($z_1/z_2=36/26$)　表 8-3

定子谐波次数	转子谐波次数			定子谐波次数	转子谐波次数		
	$k=0$	$k=+1$	$k=-1$		$k=0$	$k=+1$	$k=-1$
$\nu=2$	2	28°	$-24^{\times\circ}$	$\nu=2$	2	28°	$-24^{\times\circ}$
4	4	30	−22°	−20	−20	6	−46
−4	−4	22	−30	−22	−22	4°	−48
8	8	34	−18	24	24	50	$-2^{\times}$
−8	−8	18	−34°	−24	−24	2°	−50
−10	−10	16°	−36	26	26	52	0
12	12	38°	$-14^{\times}$	28	28	54	2°
−12	−12	14°	$-38^{\times}$	−28	−28	−2	−54
14	14	40	$-12^{\times\circ}$	32	32	58	6
16	16	42	−10°	−32	−32	−6	−58
−16	−16	10	−42	−34	−34	−8°	−60
20	20	46	−6	38	38	64	$12^{\times\circ}$

注：表中各转子谐波右上角带"°"号者符合 $\mu_a=\nu_b$ 条件，右上角带"×"号者符合 $\mu_a=-\nu_b$ 条件。详见文中。

波谱(转子槽数 $z_2=26$)。

表 8-3 中同一横列的各次转子谐波都由同列的定子谐波感应产生。

前已说明,定子 ν 次谐波磁场的旋转速度:

$$n_\nu=\frac{p}{\nu}n_1$$

另外,可以算出,由 ν 次定子谐波产生的 μ 次转子谐波,其旋转速度(相对于不动的定子)n_μ 为:

$$n_\mu=\frac{p}{\mu}\left[1+\frac{\mu-\nu}{p}(1-s)\right]n_1 \tag{8-1}$$

由式可知,μ 次转子谐波旋转速度是随转子转差变化而变化的,转子转速愈高,转差率 s 愈小,n_μ 愈大。这一点是可以理解的,因为 μ 次谐波是转子的谐波,并且转速 n_μ 是相对于静止的定子的。

从表 8-3 中可以看到,$k=0$ 一行的转子谐波次数和产生它的定子谐波次数相同,并且正负号(即转向)也相同,即 $\mu=\nu$。对照(8-1)式可知,这些转子谐波的转速

$$n_\mu=\frac{p}{\mu}\left[1+\frac{0}{p}(1-s)\right]n_1$$

$$=\frac{p}{\mu}n_1=\frac{p}{\nu}n_1=n_\nu$$

即和产生它的定子谐波转速相等。前面所说的异步附加转矩正是这一行的转子谐波磁场和产生它的定子谐波磁场相互作用产生的。而其余各次转子谐波在一定的条件下则会和某些定子谐波相互作用产生同步附加转矩。下面就分析一下产生同步附加转矩的条件。

前已说明同步电动机中作用于转子上的转矩叫做“同步转矩”。在同步电动机中转子磁场的极对数和定子相同,并且

是自身单独产生（例如用专门的激磁绕组），并非异步电动机那样是由定子磁场“感应”产生的。当定子绕组通以电流产生旋转磁场时，它就和同极数的转子磁场相互作用使转子产生同步转矩而转动。由于转子磁场并非定子感应产生，因此转子转速就等于定子旋转磁场的转速，即它们之间是“同步”的关系。换一句话说就是，同步电动机运行时转子磁场的旋转速度等于定子磁场的旋转速度。

一只电动机处在“同步”状态下稳定运转，它的转速是不变的。如果由于外来原因使转子转速在一定范围内发生变化，那末电机的“同步”状态将暂时受到破坏；当转子转速低于同步转速时，作用于转子上的转矩将增大，相当于产生了一个正转矩迭加在原有转矩上，结果是使转子转速回升，恢复同步状态；当转子转速高于同步转速时，作用于转子上的转矩将减小，相当于产生了一个负转矩迭加在原有转矩上，结果也使转子转速恢复同步状态。

异步电动机中由于某一对定、转子谐波磁场的作用，如果在某一转速时发生了与同步电动机一样的作用，则由于刚才所说的原因，电机转速变化时在该转速（即同步转速）附近电机转矩会发生急剧变化。当转子转速大于发生同步电动机作用的那对定、转子谐波磁场的同步转速时，相当于有一个负转矩迭加在电机原有转矩上，使电机转矩急剧下降。反之，当转子转速低于发生同步电动机作用的那对定、转子谐波磁场的同步转速时，相当于有一个正转矩迭加在电机原有转矩上，使电机转矩急剧上升。这种情况表现在电动机转矩曲线上，就是在该对谐波磁场同步转速附近出现一个较陡的“谷”，如图8-16所示。由于这个谷是谐波磁场的同步附加转矩造成的，所以我们把它叫作“同步谷”。谷的深度取决于产生此同步附



图 8-16　转矩曲线上的同步谷

加转矩的那对定、转子谐波磁场（主要是齿谐波）本身的强弱。

了解了上述概念后，我们就可以知道，异步电动机中除 $k=0$ 以外的各次转子谐波要和定子谐波相互作用产生“同步附加转矩”，必须符合以下两个条件：

① 两者次数相等，这意味着极数相等，

② 两者旋转速度相等，这意味着“同步”。

假设 ν_a 次定子谐波感应产生 μ_a 次转子谐波，这 μ_a 次转子谐波就可能和另一个 ν_b 次定子谐波相互作用产生同步转矩(注意：μ_a 次转子谐波并不是由 ν_b 次定子谐波所感生)。对照上面两点可以写出 μ_a 次转子谐波与 ν_b 次定子谐波两者相互作用产生同步附加转矩的条件：

$$\mu_a = \pm\nu_b \tag{8-2}$$

$$n_{\nu_b} = n_{\mu_a}$$

$$\frac{p}{\nu_b} n_1 = \frac{p}{\mu_a}\left[1 + \frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1-s)\right] n_1$$

$$\frac{1}{\nu_b} = \frac{1}{\mu_a}\left[1 + \frac{\mu_a - \nu_a}{p}(1-s)\right] \tag{8-3}$$

符合 (8-2) 和 (8-3) 式的定、转子谐波是完全可能有的。以表 8-3 所列为例，由 $+2$ 次定子谐波（电动机基波）产生的

+28 次($k=1$)转子谐波和定子 +28 次谐波之间，由 +14 次定子谐波产生的 −12 次转子谐波和定子 +12 次谐波之间，就分别符合 $\mu_a=\nu_b$ 和 $\mu_a=-\nu_b$ 的条件。下面分别讨论 $\mu_a=\nu_b$ 和 $\mu_a=-\nu_b$ 两种情况下同步附加转矩的情况。

① $\mu_a=\nu_b$(同次同号)时同步附加转矩情况：

$\mu_a=\nu_b$，本身就表示了这一对定子和转子谐波极数相同。所以需讨论的问题只是在什么条件下两者旋转速度相等，即符合(8-3)式。

分析(8-3)式可知，在 $\mu_a=\nu_b$ 时要符合该式，只有在 $s=1$、即 $\dfrac{\mu_a-\nu_a}{p}(1-s)=0$ 的条件下才可能。

转差率 $s=1$ 代表转子转速等于零，因此可以得出结论：μ_a 次转子谐波和与它同次同号的另一定子谐波之间将在电动机起动瞬间($s=1$、$n=0$)相互作用产生同步附加转矩，附加转矩的大小取决于这两个谐波本身的强弱。

起动瞬间产生的同步附加转矩的一个显著特点是：其大小和定、转子之间相对位置有关。随着定、转子之间相对位置的变化，同步附加转矩的大小将发生周期性的变化即发生波动，一个周期约为一个齿距。这个现象是可以理解的，因为定、转子铁心开有槽、齿，定、转子之间相对位置变化实际上就是槽、齿之间相对位置变化，这就使气隙导磁能力发生变化。定子是不动的，因此这个变化显然将带有周期性，并且是以约一个齿距为周期的。

以表 8-3 所示为例，表中转子谐波凡右上角带有"°"的都符合 $\mu_a=\nu_b$ 的条件，都将在起动瞬间和同次同号的定子谐波相互作用而产生同步附加转矩。由表可见，这里面包括有转子齿谐波 +28 次、−24 次和定子 +28 次、−24 次谐波之

间，以及定子齿谐波 +38 次、−34 次和转子 +38 次、−34 次谐波之间相互作用产生的同步附加转矩，因此起动瞬间同步附加转矩就比较严重。

随定、转子相对位置变化而波动的起动瞬间同步附加转矩加在由电动机基波磁场产生的电机起动转矩上，必然也会使电机总的起动转矩发生波动。图 8-17 是定子槽数 36、转子槽数 26、跨距 1—7、第九章方案 13 在四极时，试验电压 135 伏时的起动转矩波动曲线，由图可知，定、转子之间有许多位置起动转矩都很小，有些位置起动转矩甚至为负值，在这些位置上电动机将起动不出，造成所谓“死点”。这就是同步附加转矩对电动机起动性能的一个影响。

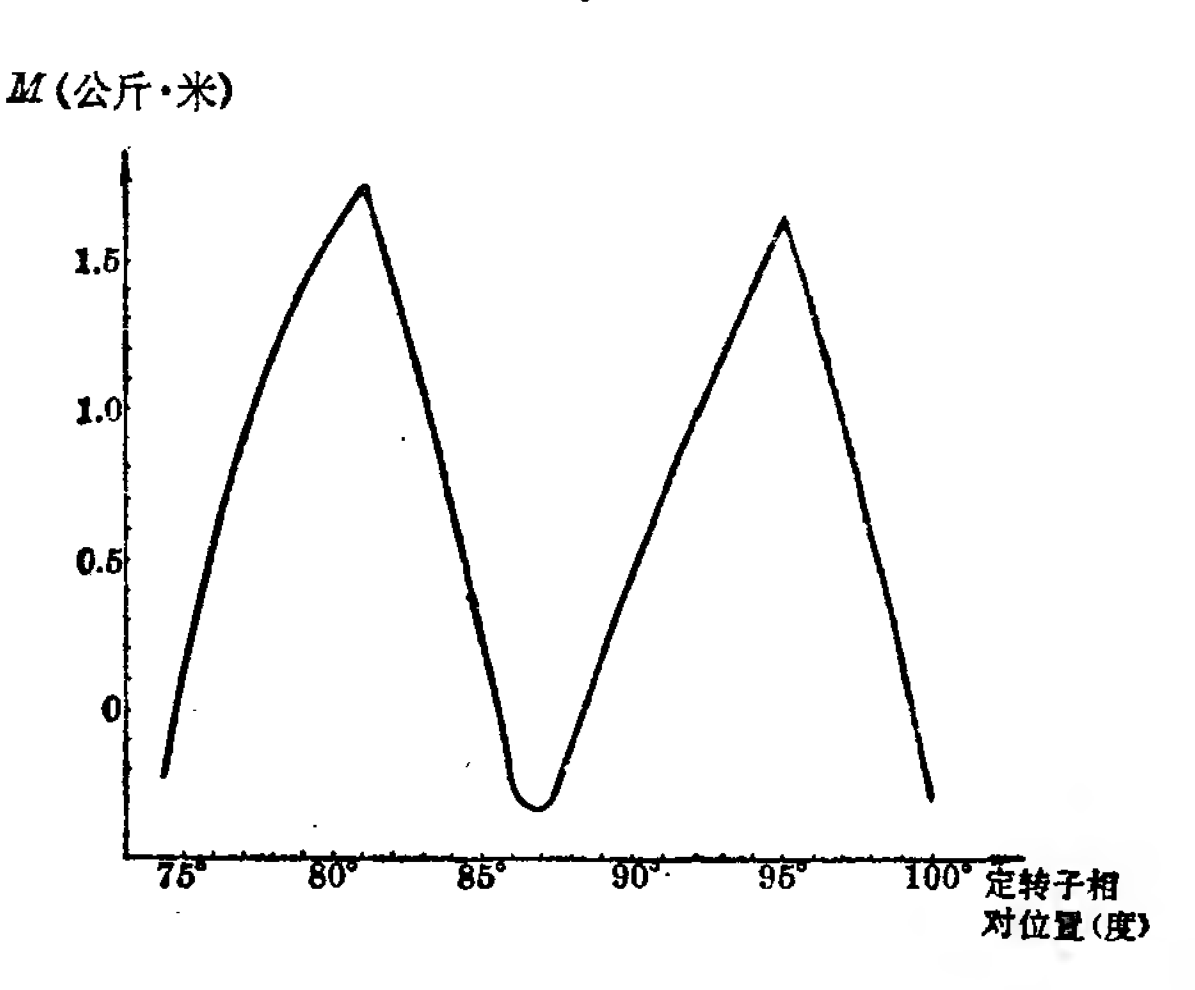


图 8-17 起动转矩随定、转子相对位置而变的例子(方案 13，四极)

② $\mu_a = -\nu_b$ (同次异号)时同步附加转矩情况：

此时两者极数也相同。要符合旋转速度相等的条件也必须符合(8-3)式。而在 $\mu_a = -\nu_b$ 时(8-3)式成为：

$$-1=1+\frac{\mu_a-\nu_a}{p}(1-s)$$

从这个式子可以求出两个谐波旋转速度相等时转差率 s 以及转子转速 n 应有的数值:

$$\frac{\mu_a-\nu_a}{p}(1-s)=-2$$

$$1-s=\frac{-2p}{\mu_a-\nu_a}$$

$$s=1+\frac{2p}{\mu_a-\nu_a}$$

又 $$\mu_a=kz_2+\nu_a$$

即 $$\mu_a-\nu_a=kz_2$$

因此

$$s=1+\frac{2p}{kz_2}$$

相应的转子转速

$$n=(1-s)n_1$$

$$=\frac{-2p}{kz_2}\cdot\frac{6000}{2p}$$

$$=-\frac{6000}{kz_2} \tag{8-4}$$

这就告诉我们，当转子转速 $n=\frac{-6000}{kz_2}$ 时，μ_a 次转子谐波和与它同次异号的定子谐波相互作用将产生同步附加转矩。

分析(8-4)式可看到，k 为正值时 n 将为负值。对于拖动负载的电动机来说转速为负是没有意义的（n 为负实际上代表电动机的另一种工作状态——制动状态)。因此，k 必须取负值，使 n 为正值，才能符合电动机的实际工作状态。也就是

说，在异步电动机中，只有 $k=-1$ 的各次转子谐波在转子转速 $n=\frac{6000}{z_2}$ 时，将和与它同次异号的定子谐波相互作用产生同步附加转矩。

在表 8-3 中，$k=-1$ 一行中转子谐波凡右上角带“×”号的，都符合 $\mu_a=-\nu_b$ 的条件，都将在 $n=\frac{6000}{26}\approx 230$ 转/分时与同次异号的定子谐波相互作用产生同步附加转矩。由该表可见，这里面包括有定子齿谐波 +38 次与转子 −38 次谐波之间，以及转子齿谐波 −24 次与定子 +24 次谐波之间相互作用而产生的同步附加转矩，因此它的影响也比较严重，此时电动机转矩曲线见图 8-18，由图可知曲线在约 230 转/分处有一个很深的“同步谷”。由于同步谷的存在，使该处最低转矩大大下降，和异步附加转矩造成的凹陷一样，电动机起动时就可能停留在约 230 转/分附近低速潜行；在图 8-18 中电动机稳定工作点就将是 a' 点而不是正常的 a 点。这就是同步附加转矩对电动机起动性能的又一个影响。

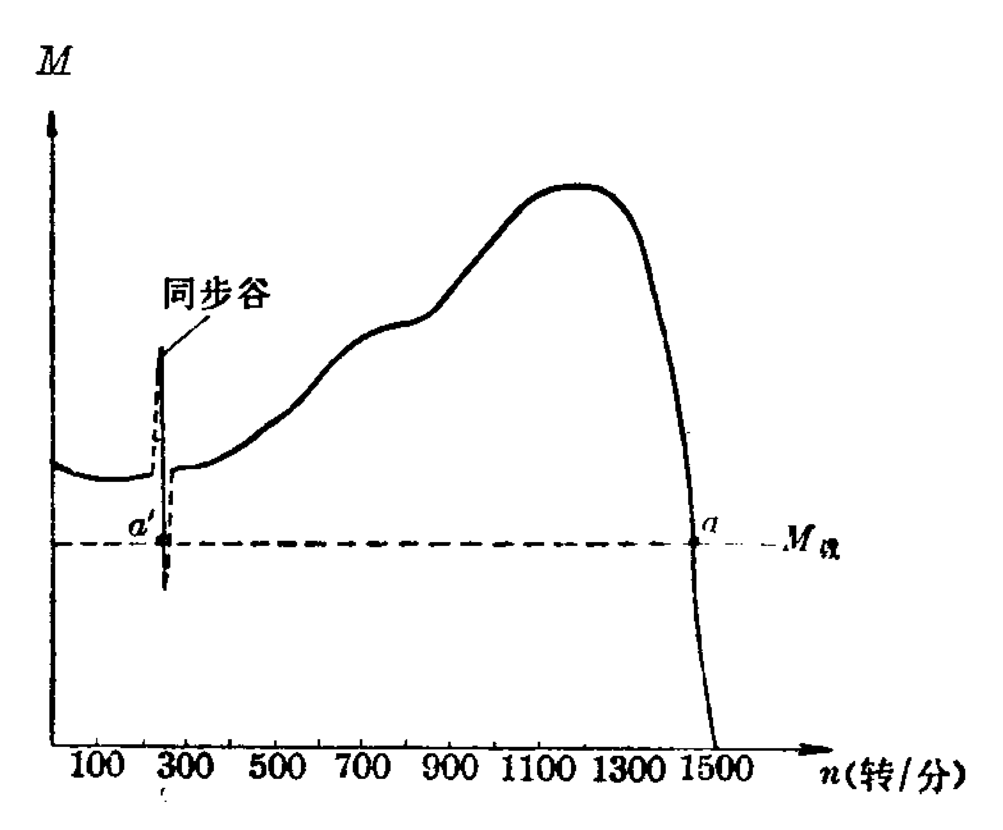


图 8-18 同步谷对电动机起动性能的影响

2. 产生振动噪音

噪音，对于运转中的电动机来说总是存在的。问题只在于有正常噪音和非正常噪音之分。

任何一只电动机在运转时，它的基波磁场本身就会产生噪音，其振动频率为电源频率的两倍(100 赫)，这种噪音是正常的。

但是在某些条件下，由于定、转子之间谐波磁场的作用，在异步电动机中也会产生噪音，甚至可能很严重。这种噪音是非正常的，应该设法避免。下面就分析这种非正常噪音产生的原因。

从机械原理角度来看，异步电动机的噪音是由于转子振动而产生的。转子发生振动，就意味着有“力”作用于转子，并且这个力的作用点还必然是随转子的转动而沿气隙圆周转动的。再从电磁的角度来看，两者正相符合，这个力就是存在于气隙中的“单方向磁拉力”。

我们已熟知，电动机转子之所以能转动，是由于定子磁场和转子磁场两者相互作用的结果。既然有磁场的相互作用，那末定、转子铁心之间必然就有一种磁性的吸力，由于定子是固定的，这个吸力就表现为对转子的一种“磁拉力”。在正常情况下，转子各处所受的磁拉力基本是对称、均匀的，如图 8-19 (示意图)所示，所以这种磁拉力不会使转子发生振动而产生噪音。但是，一旦对称条件破坏，这种磁拉力就表现为单方向性的。单方向磁拉力大到一定程度时，转子转

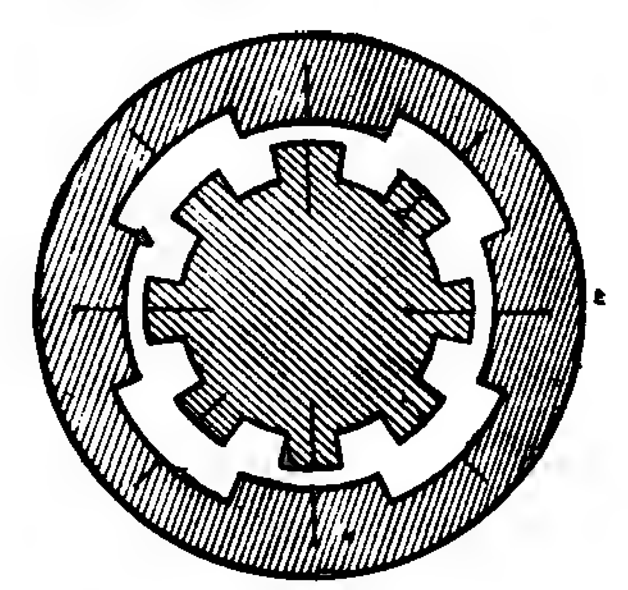


图 8-19 正常情况下转子受到的磁拉力示意

动时就会发生径向振动而引起噪音。这样，问题就在于：什么条件下转子会受到单方向磁拉力，它和谐波磁场有什么关系？

伟大领袖毛主席教导我们：“**就人类认识运动的秩序说来，总是由认识个别的和特殊的事物，逐步地扩大到认识一般的事物。**”在分析非正常噪音的产生这个问题时，我们就将按照这一规律进行。

首先我们看到异步电动机的定子和转子铁心都开有槽、齿。当定子齿对准转子齿或者说两齿轴线重合时，它们之间的磁拉力必然较大。如果在气隙圆周上这种轴线的重合不对称，气隙中就会有单方向磁拉力产生。这种不对称在定、转子槽配合不恰当时就会产生。例如定子槽数与转子槽数相差为1就比较严重。图 8-20 就是这种情况，为了简单而清楚地说明问题，图中所画定子槽数为4、转子槽数为3，因而定子齿距＝90°，转子齿距＝120°。图中所示位置定子齿 a 与转子齿“1”对准，显然在该轴线重合点上存在有单方向磁拉力。假设转子顺时针旋转 30°，则此时定子齿 b 与转子齿“2”轴线重合，单方向磁拉力作用点由齿 a 移至齿 b。转子再转 30°，轴线重合点即单方向磁拉力作用点又由齿 b 移至齿 c(与转子齿“3”重合)。再继续转 30°，定子齿 d 与转子齿“1”对准，单方向磁拉力作用点由齿 c 移至齿 d。再继续转 30°，单方向磁拉力作用点又将由齿 d 移至齿 a (与转子齿“2”重合)。我们看到，转子旋转时单方向磁拉力作用点也跟着旋转，并且正好是

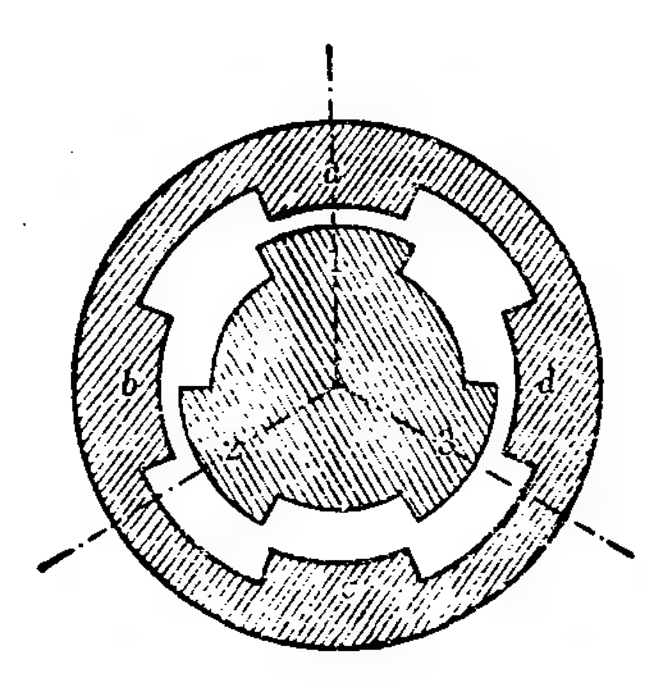


图 8-20　转子受到单向磁拉力示意(一)

转子转过一个齿距，作用点旋转一周，即单方向磁拉力作用点旋转速度为转子转速的 z_2 倍。这种作用点高速转动的单方向磁拉力就会引起电动机发生径向振动而产生噪音。

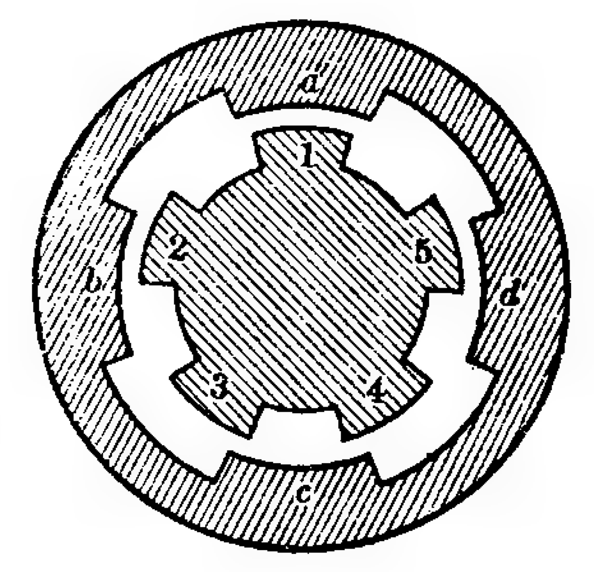


图 8-21　转子受到单向磁拉力示意(二)

图 8-20 是定子槽数比转子槽数大 1。定子槽数比转子槽数小 1 也同样，见图 8-21，图中轴线重合点在定子齿 a。转子顺转 18° 后，重合点移至定子齿 d；再转 18° 又移至定子齿 c；再转 18° 又移至定子齿 b；转子转完一个齿距(72°)重合点又转回到定子齿 a，正好旋转一周。这种情况和图 8-20 一样，因此也将产生噪音。

总结起来一句话，就是定、转子槽数相差为 1 就会产生比较严重的噪音。

现在我们就从具体到抽象来说明上述情况和谐波磁场的关系。第一节已经说过定子和转子绕组的磁势中都含有齿谐波，其次数分别为 $\pm z_1+p$ 和 $\pm z_2+p$。从数字上可明显看出 z_1 和 z_2 相差 1，就是 $\pm z_1+p$ 和 $\pm z_2+p$ 相差 1，也就是定子齿谐波次数和转子齿谐波次数相差 1。因此我们可以说，如果定、转子齿谐波两者次数相差 1 就会产生比较严重的噪音。实际上不仅齿谐波磁场是如此，其他谐波磁场也如此，只要两者次数差 1 就可能产生噪音，其大小取决于该谐波本身的强弱。

现以第九章方案 13(跨距 1—8)、槽配合 $z_1/z_2=36/33$ 的四极为例来分析其噪音情况，表 8-4 就是该情况下的定、转子谐波谱($k=0$ 的转子谐波未列出)。

槽配合为36/33、方案13四极时的定、转子谐波谱　表8-4

定子谐波次数(ν)	转子谐波次数(μ)		定子谐波次数(ν)	转子谐波次数(μ)	
	$k=1$	$k=-1$		$k=1$	$k=-1$
$\nu=2$	35	−31	16	49	−17
4	37	−29	−16	17	−49
−4	29	−37	−22	11	−55
8	41	−25	24	57	−9
−8	25	−41	−24	9	−57
−10	23	−43	28	61	−5
12	45	−21	−34	−1	−67
−12	21	−45	38	71	5
14	47	−19			

由表8-4可见，存在有许多次数相差为1的定、转子谐波，并且其中含有齿谐波。这就可能在气隙中产生较严重的单方向磁拉力，从而导致振动产生噪音。实际试验结果也证明，该种情况下电动机起动和运转时，尤其是起动时有较大的噪音。

异步电动机定子槽数都是偶数(24、36、48、54、72……)。因此利用这个方法分析噪音时可以发现，如果转子槽数也为偶数，则不会产生次数相差1的定、转子谐波。仍以前例作分析，当槽配合 $z_1/z_2=36/32$ 时定、转子谐波谱如表8-5所示。

由表可知，定、转子谐波次数没有相差为1的。事实上转子谐波次数 $\mu=kz_2+\nu$，z_2 为偶数时，kz_2 也为偶数。ν 为偶数时 μ 也必为偶数；ν 为奇数时 μ 也必为奇数，两者不会相差1。如果画出类似图8-20和图8-21的图，也可以清楚地看到由于定、转子槽数都是偶数，当某一对定、转子齿轴线重合时，其

槽配合为36/32的定、转子谐波谱　　表8-5

定子谐波次数 (ν)	转子谐波次数 (μ)	
	$k=1$	$k=-1$
$\nu=2$	34	−30
4	36	−28
−4	28	−36
8	40	−24
−8	24	−40
−10	22	−42
12	44	−20
−12	20	−44
14	46	−18
16	48	−16
−16	16	−48
−22	10	−54
24	56	−8
−24	8	−56
28	60	−4
−34	−2	−66
38	70	6

对称方向也必有一对定、转子齿轴线重合，因此转子所受磁拉力比较对称，振动噪音较之奇数槽必大大减小。

实际的电动机，定、转子槽数只差1是没有的。但是在改绕时却可能碰到这样的槽配合，即在选定的绕组方案条件下

它会产生次数相差 1 的定、转子谐波，因而引起振动噪音。这就应当设法避免，特别是改绕中选用了谐波比较多的绕组方案时尤其要注意。

如果考虑高次谐波中幅值比较强、因而影响比较大的齿谐波，避免定、转子齿谐波次数相差 1，我们就可以得到应该避免的确切的槽配合数据。

已知定、转子齿谐波次数分别为 $\pm z_1+p$ 和 $\pm z_2+p$。为了避免两者相差 1，必须满足不等式：

$$(\pm z_1+p)\pm(\pm z_2+p)\neq\pm 1$$

将此不等式展开可得到下面八个不等式

$$\begin{cases} z_1+p+z_2+p\neq\pm 1 & (1)\\ z_1+p-z_2+p\neq\pm 1 & (2)\\ z_1+p-z_2-p\neq\pm 1 & (3)\\ z_1+p+z_2-p\neq\pm 1 & (4)\\ -z_1+p+z_2+p\neq\pm 1 & (5)\\ -z_1+p-z_2+p\neq\pm 1 & (6)\\ -z_1+p-z_2-p\neq\pm 1 & (7)\\ -z_1+p+z_2-p\neq\pm 1 & (8) \end{cases}$$

整理后得

$$\begin{cases} z_1+z_2\neq\pm 1-2p & (1)\\ z_1-z_2\neq\pm 1-2p & (2)\\ z_1-z_2\neq\pm 1 & (3)\\ z_1+z_2\neq\pm 1 & (4)\\ z_1-z_2\neq\pm 1+2p & (5)\\ z_1+z_2\neq\pm 1+2p & (6)\\ z_1+z_2\neq\pm 1 & (7)\\ z_1-z_2\neq\pm 1 & (8) \end{cases}$$

上面八个不等式中第(1)、(4)、(6)、三式对实际的电动机总是能满足的，没有实际意义。(7)式与(4)式重复，(3)式与(8)式重复，(2)、(5)两式可合写成 $z_1-z_2\neq\pm2p\pm1$。因此可以得出结论：为了避免定、转子齿谐波次数相差1而产生振动噪音，槽配合应满足下列不等式：

$$\begin{cases} z_1-z_2\neq\pm1 \\ z_1-z_2\neq\pm2p\pm1 \end{cases}$$

3．增加损耗，降低效率

谐波磁场对电动机性能的再一个影响是降低效率，也就是说会减小电动机出力，其原因如下。

(1) 由于气隙中谐波磁场的存在增加了异步电动机的损耗

所增加的这部分损耗叫作谐波磁场的附加损耗，它主要包括以下两部分：

1）定、转子铁心内谐波磁场铁损耗。我们知道一块铁心如果处在交变磁场之中，铁心会发热而产生铁损耗，这个铁损耗包括“涡流损耗”和“磁滞损耗”两个部分。

异步电动机中，谐波磁场都是交变的旋转磁场，因此它都会使定、转子铁心产生涡流和磁滞损耗。两者比较起来，涡流损耗是主要的，由于涡流主要集中在铁心表面，因此这种损耗又叫作“表面损耗”。

实际上转子转动时整个转子齿内的磁通也是“脉动”的，即大小是在变化的，因而整个转子齿内也会产生铁损耗，这个铁损耗叫作“脉动损耗”。

谐波磁场在铁心内造成的表面损耗和脉动损耗，两者合起来就组成了谐波磁场的附加铁损耗。

2）转子绕组中的谐波电流铜损耗，它是由谐波磁场在转

子绕组中的感应电流引起的。转子绕组的导条具有一定电阻，谐波电流流通当然就会产生铜耗。

谐波磁场造成的附加损耗直接降低了电动机的效率。附加损耗的大小取决于谐波磁场本身的强弱，一般情况下非正常相带绕组谐波要丰富些，因此其附加损耗也相对要大些，空载电流也要大些。

(2) 气隙中谐波磁场的存在，减少了定子传给转子的电磁功率

气隙中谐波磁场在定子绕组中会感应出一个等于电源频率的电势（因为ν次谐波其极对数虽为基波的$\frac{\nu}{p}$倍，但转速却是基波转速的$\frac{p}{\nu}$倍），这个感应电势可以看作是“谐波漏抗压降”，它和由漏磁通造成的漏抗压降一样，会减少定子绕组中的基波感应电势（在电势公式中的反映就是压降系数K_E的数值减小），从而减少了由定子传给转子的电磁功率，减小了电动机出力。

第四节　谐波磁场影响的克服方法

第三节中我们分析了谐波磁场对电动机性能的影响，有三个方面：一是可能产生异步和同步附加转矩，从而影响电动机的起动性能；二是可能产生振动噪音；三是增加电动机损耗，降低效率。这三方面影响中前两方面是主要的，本节即讨论它们的克服方法。

毛主席教导我们：要“**用不同的方法去解决不同的矛盾**”。下面我们就分别就异步附加转矩、同步附加转矩和振动噪音这三种不同的情况，叙述它们的克服方法。

1. 异步附加转矩的克服方法

异步附加转矩的影响是使电动机的转矩曲线发生凹陷，严重时造成电动机的低速潜行，不能起动到正常的额定转速。

产生异步附加转矩的原因是定子绕组磁场中某一次或几次谐波幅值比较强。因此，欲减小异步附加转矩就必须从削弱谐波磁场入手。这可以用以下两种方法

(1) 采用谐波较少的绕组方案

一只单速异步电动机改绕成单绕组多速电动机，在排列绕组方案时可能同时有几种方案存在，不同的绕组方案所含谐波情况也不同。在可能的条件下（照顾到出力等情况），从减少谐波磁场影响角度上考虑，以采用谐波较少的绕组方案为好。

比较不同方案的谐波情况时，可以应用第三章介绍的方法分别画出不同方案的磁势曲线，根据它们与正弦波形的相差程度即可作出判断。由于所取三相电流瞬间的不同，磁势曲线形状也不同，因此画不同方案磁势曲线时所取三相电流瞬间应一致。对于一个方案，则应至少取两个瞬间画出其相应的磁势曲线，以便能作出比较正确的判断。

(2) 选择适当跨距

在第三章里我们介绍过绕组系数，知道它等于短距系数 K_y 和分布系数 K_d 的乘积。那时我们是针对电动机基波而言的，事实上每一次谐波也都有它的绕组系数，它等于该次谐波的短距系数和分布系数的乘积。如果我们有意识地选择跨距使某一次谐波的短距系数很小，甚至等于零；那末该次谐波的绕组系数就会很小，甚至等于零；该次谐波磁场也会很小甚至等于零，它所产生的异步附加转矩也就跟着会变得很小甚至完全消除。

为了确定欲削弱 ν 次谐波磁场所需的跨距数值，必须知道 ν 次谐波短距系数 $K_{y\nu}$ 的计算公式。为此我们先写出第三章已介绍过的基波短距系数 K_y 的计算公式：

$$K_y=\sin\frac{y}{\tau}90^\circ$$

利用这个式子可以很方便地得出谐波短距系数的算式。事实上 ν 次谐波的不同点在于它的极数为基波的 ν' 倍 $\left(\nu'\right.$ 就是统一前的谐波次数。基波次数 $=1$ 时，$\nu'=\nu$。基波次数 $=p$ 时，$\left.\nu'=\frac{\nu}{p}\right)$。因此 ν 次谐波的满距槽数 $\tau_\nu=\frac{\tau}{\nu'}$，比基波满距槽数 τ 小。将 K_y 计算公式中的 τ 代以 τ_ν 即得 ν 次谐波短距系数的计算公式如下：

$$K_{y\nu}=\sin\frac{y}{\frac{\tau}{\nu'}}90^\circ$$

$$=\sin\frac{\nu' y}{\tau}90^\circ \qquad (8\text{-}5)$$

现举例说明选择适当跨距削弱谐波磁场的情况。前节说过第九章方案 10 和方案 11、六极、跨距 1—6 时 +5 次谐波（分别占基波的 16% 和 22.9%）将造成电动机转矩曲线在 600 转/分附近发生凹陷。我们来计算此时的 +5 次谐波短距系数。

由于基波次数 $p=3$，因此 +5 次谐波 $\nu'=\frac{5}{3}$。基波满距槽数 $\tau=\frac{z_1}{2p}=\frac{36}{6}=6$。跨距为 1—6 时 $\frac{y}{\tau}=\frac{5}{6}$。所以：

$$Kk_{y5(1-6)}=\sin\frac{5}{3}\times\frac{5}{6}\times 90^\circ=\sin 125^\circ$$

$$=\sin(180^\circ-55^\circ)=\sin 55^\circ=0.82$$

现试选择跨距为1—7或1—8，即 $\frac{y}{\tau}=1$ 或 $\frac{y}{\tau}=\frac{7}{6}$，则算得：

$$K_{y5(1-7)}=\sin\frac{5}{3}\times1\times90^\circ=\sin150^\circ$$
$$=\sin(180^\circ-30^\circ)=\sin30^\circ$$
$$=0.5=0.82\times0.6$$
$$K_{y5(1-8)}=\sin\frac{5}{3}\times\frac{7}{6}\times90^\circ=\sin175^\circ$$
$$=\sin(180^\circ-5^\circ)=\sin5^\circ$$
$$=0.087=0.82\times0.106$$

与 $K_{y5(1-6)}$ 比较，短距系数减小为原来的0.6倍或0.106倍。由此绕组系数及+5次谐波磁场幅值也降为原值的0.6倍或0.106倍。图8-22和图8-23分别画出了方案10和方案11在六极时电动机转矩曲线，图中曲线1跨距为1—6，曲线2跨距为1—7。由图可见，由于选择了1—7的跨距，+5次谐波磁场降为原来的0.6倍，曲线在600转/分附近的凹陷

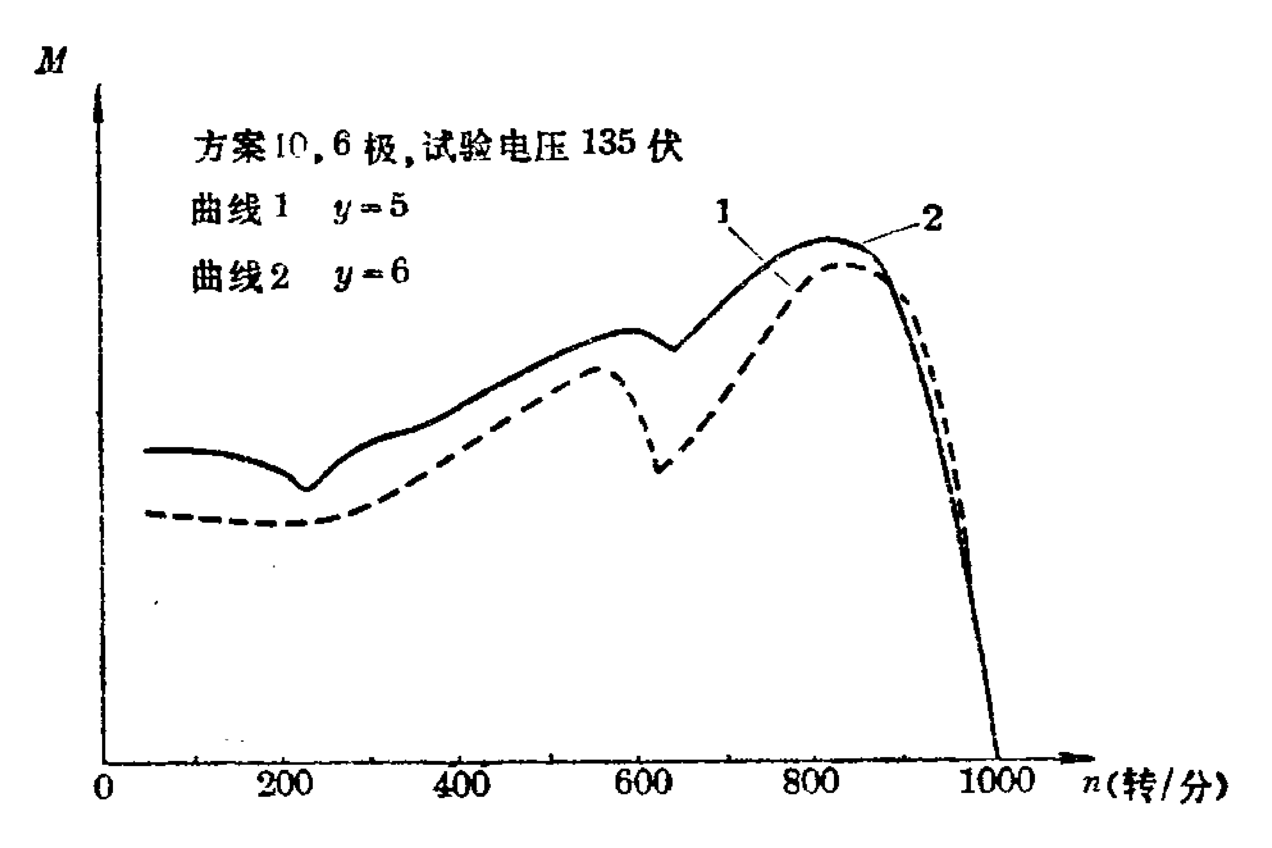


图8-22　跨距不同时谐波磁场对电动机性能的影响的例子

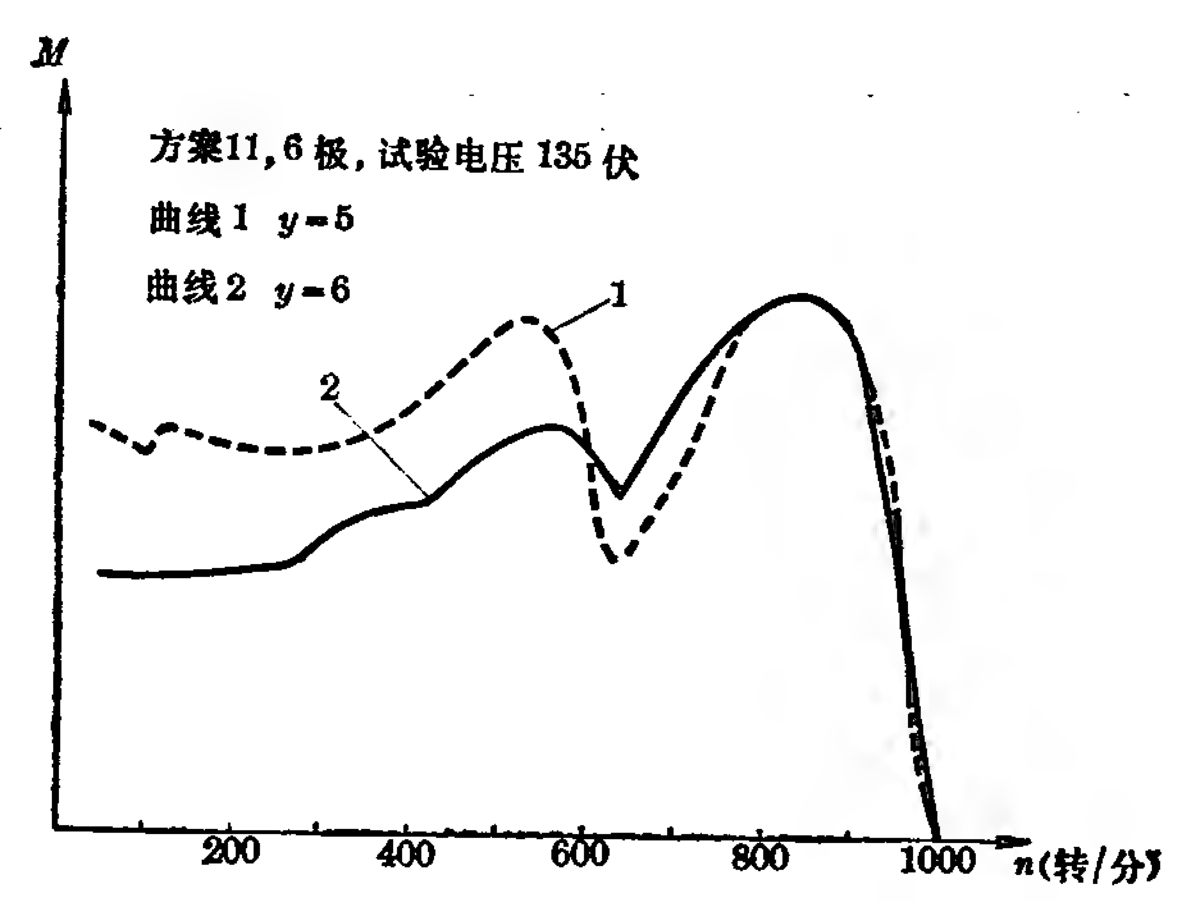


图 8-23 跨距不同时谐波磁场对电动机性能的影响的又一例

明显好转，对电动机起动性能已没有影响。

再以第九章方案 12 的四极为例，跨距 1—7 和 1—8 时 +4 次谐波分别占基波的 19.1% 和 13%，它造成转矩曲线在 750 转/分附近发生很大凹陷。如果我们选择跨距为 1—10，即 $\frac{y}{\tau}=1$，计算此时 +4 次谐波 ($\nu'=2$) 的短距系数：

$$K_{y4(1-10)}=\sin 2\times1\times90^\circ$$
$$=\sin 180^\circ=0$$

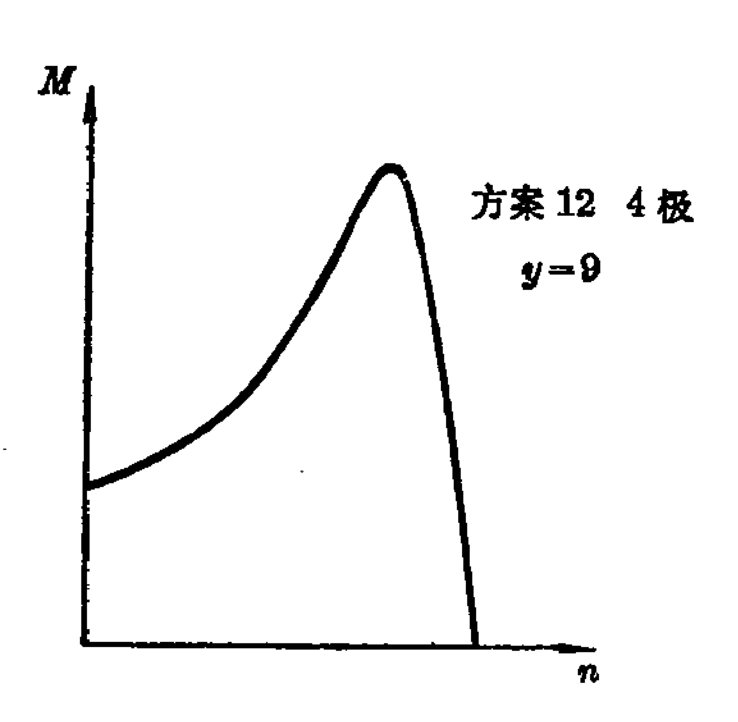


图 8-24 方案 12 选择适当的跨距后对电动机性能的改善

因此 +4 次谐波绕组系数及谐波磁场都将等于零，即完全消除。图 8-24 画出了此时的转矩曲线，与图 8-13 比较可见，750 转/分附近的凹陷已完全消失。

进一步计算可知，跨距为 1—10 时所有 4 的倍数次谐波

包括 ±8、±12、±16、±20、±24、±28、±32、±36 等次都将消失。由于许多谐波的消失，绕组磁势曲线也将有明显改善。图 8-25 画出了此时的磁势曲线，与图 8-11(该图即为第九章方案 12，跨距 1—8 时四极磁势曲线）比较，即可看出曲线与正弦波形的差别已明显缩小，事实上它已和 60° 相带绕组磁势曲线一样。

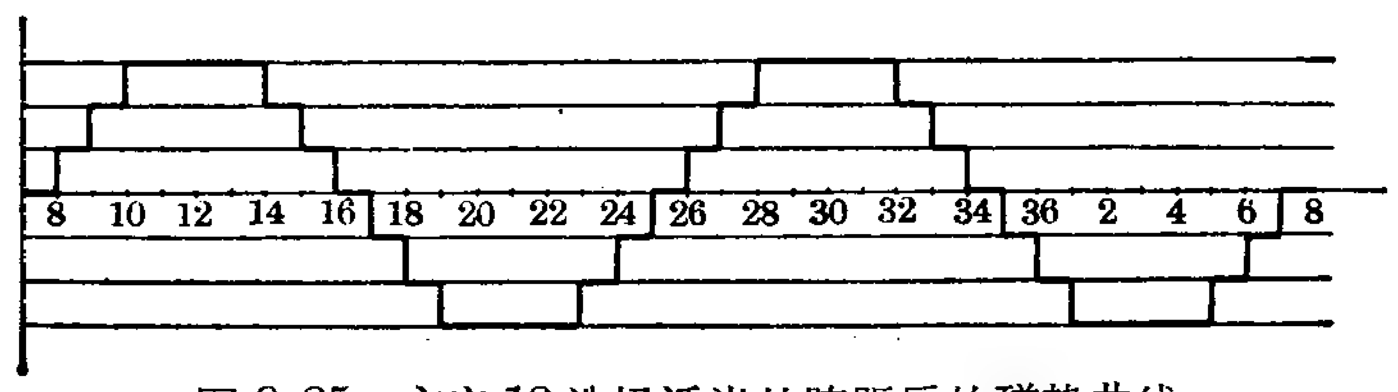


图 8-25　方案 12 选择适当的跨距后的磁势曲线

由 (8-5) 式实际上可得出消除某次谐波的一般规律：欲使 ν 次谐波完全消失，跨距 y 应选择为

$$y=\frac{2\tau}{\nu'} \tag{8-6}$$

此时

$$K_{y\nu}=\sin\frac{\nu'}{\tau}\cdot y\cdot 90^\circ=\sin\frac{\nu'}{\tau}\cdot\frac{2\tau}{\nu'}\cdot 90^\circ$$

$$=\sin 180^\circ=0$$

实际上改绕中确定单绕组多速电动机跨距时主要还应从出力上来考虑。通常双速电动机在多极数时分布系数较低，因此多数情况下双速电动机跨距取接近或等于多极数的满距，以使两种极数时的绕组系数接近。也有少极数时分布系数低的情况，此时跨距可取接近或等于少极数的满距，目的也是使两种极数时绕组系数接近。当然，如果使用中要求少极数出力高并作为主要极数使用，多极数出力低只作为辅助性间歇使用，那么即使多极数分布系数低，跨距也可选择为接近

少极数的满距，或选跨距为少极数满距的 2/3（单速异步电动机由于采用 60° 相带绕组，所以跨距一般为较满距短 1～2 槽，此时主要的两个谐波即五、七次谐波已有相当削弱）。三速电动机跨距一般情况下也可按"尽量使各个极数时绕组系数接近"的原则来选取。

改绕后电动机在试运转中如发现由于异步附加转矩而停留在低速潜行，并已判明造成低速潜行的那个谐波次数后，即可根据(8-6)式来重新选择跨距以削弱或消除该次谐波。

2. 同步附加转矩的克服方法

同步附加转矩的影响是使电动机起动转矩发生波动，转子在某些位置时出现"死点"，起动不出；或者使电动机转矩曲线在某一点附近产生同步谷，严重时和异步附加转矩一样，造成电动机的低速潜行。

同步附加转矩的产生是转子谐波和同次定子谐波相互作用的结果。这些谐波次数一般都较高，就幅值来说，除齿谐波外一般都较小（有些转子谐波次数可能较低，但它却是由高次的定子谐波感应产生的，因此幅值也较小）。因此可以认为同步附加转矩主要是由齿谐波产生的。

克服同步附加转矩的方法主要是削弱齿谐波幅值，以及选择适当的定、转子槽配合以减少或避免定、转子谐波之间的同次，特别是要避免齿谐波的同次。

(1) 削弱齿谐波幅值的方法

削弱齿谐波幅值的有效方法是采用斜槽，通常是用于转子上，就是转子的槽不与电动机轴线平行而扭斜一个角度，斜度一般为等于或接近一个定子齿距。

采用斜槽以后，在每个槽斜度的一段距离内气隙导磁能力将比较均匀，因而就可以削弱齿谐波的强度。

由于斜槽能削弱齿谐波改善电动机的起动性能，因此工厂制造时几乎已普遍采用，对改绕来说，这个方法是不成问题的。

也许要问：能不能象削弱谐波异步附加转矩那样，选择适当跨距来削弱齿谐波磁场呢？不能。因为齿谐波短距系数与基波短距系数相等，削弱了齿谐波，基波也将受到同等程度的削弱，这是不合算的。

现在以基波次数等于1的两极电动机为例，来证明齿谐波短距系数与基波短距系数相等。基波次数等于2以上，即四极以上电动机的证明方法也一样。

两极电动机极对数 $p=1$，齿谐波次数 $\nu=z_1\pm 1$，而 $z_1=2pmq=6pq=6q$，所以两极电动机齿谐波次数又可写为 $\nu=6q\pm 1$。按照(8-5)式，齿谐波短距系数 $K_{y\nu}$ 为：

$$K_{y\nu}=\sin\frac{\nu' y}{\tau}90^\circ=\sin\frac{\nu y}{\tau}90^\circ$$

$$=\sin\frac{y}{\tau}[(6q\pm 1)\cdot 90^\circ]$$

$$=\sin\left(\frac{y}{\tau}6q\cdot 90^\circ\pm\frac{y}{\tau}90^\circ\right)$$

又

$$\frac{y}{\tau}6q\cdot 90^\circ=y\cdot\frac{2p}{z_1}\cdot 6q\cdot 90^\circ=y\cdot\frac{2p}{6pq}\cdot 6q\cdot 90^\circ$$

$$=y\cdot 180^\circ$$

$$\therefore\quad K_{y\nu}=\sin\left(y\cdot 180^\circ\pm\frac{y}{\tau}90^\circ\right)$$

式中 $y\cdot 180^\circ$ 等于 180° 的整倍数，根据三角公式

$$\sin(k\cdot 180^\circ\pm\alpha)=\pm\sin\alpha\quad(k\text{ 为任意整数})$$

得

$$K_{y\nu}=\pm\sin\frac{y}{\tau}90^{\circ}=\pm K_{y}$$

这就证明了上述结论。

(2) 减少或避免定、转子谐波同次的方法

在绕组方案已定的情况下，减少或避免定、转子谐波同次的方法是：

1）选择适当的定、转子槽数配合。这个方法是主要的。我们举例来分析不同槽配合对同步附加转矩的影响。表 8-6 列出了槽配合为 36/26、36/32、36/33 时第九章方案 13，四极的定、转子谐波谱，表中“×”、“○”符号意义同前。由表 8-6 可知，槽配合为 36/26 时定、转子谐波同次的较多，其中还包括有定、转子的齿谐波（定子齿谐波为 −34 次和 38 次，转子齿谐波为 28 次和 −24 次），因此这种槽配合对电动机起动性能影响较大；槽配合为 36/32 时，定、转子谐波同次的较少，尤其是其中不包括齿谐波，因此同步附加转矩较小；槽配合为 36/33 时，定、转子谐波没有同次的，因此它不会产生同步附加转矩。

进一步分析槽配合为 36/33 的情况可发现，不仅转子槽数 $z_2=33$ 时定、转子谐波没有同次的，而且只要转子是奇数槽，定、转子谐波就不会有同次。这可以简单地加以证明：

$$\mu=kz_2+\nu$$

所论情况下 $k=\pm1$，z_2 为奇数，kz_2 也为奇数。若 ν 为偶数，则因

奇数＋偶数＝奇数

所以 μ 必为奇数，与 ν 不会有同次。若 ν 为奇数，则因

奇数＋奇数＝偶数

所以 μ 必为偶数，与 ν 也不会有同次。

方案13、当槽配合为36/26、36/32、36/33时四极定、转子谐波谱

表8-6

定子谐波次数(ν)	转子谐波次数(μ)					
	36/26		36/32		36/33	
	$k=1$	$k=-1$	$k=1$	$k=-1$	$k=1$	$k=-1$
2	28°	−24×°	34	−30	35	−31
4	30	−22°	36	−28×°	37	−29
−4	22	−30	28°	−36	29	−37
8	34	−18	40	−24×°	41	−25
−8	18	−34°	24°	−40	25	−41
−10	16°	−36	22	−42	23	−43
12	38°	−14×	44	−20×°	45	−21
−12	14°	−38×	20°	−44	21	−45
14	40	−12×°	46	−18	47	−19
16	42	−10°	48	−16	49	−17
−16	10	−42	16	−48	17	−49
20	46	−6	52	−12×°	53	−13
−20	6	−46	12°	−52	13	−53
−22	4°	−48	10	−54	11	−55
24	50	−2×	56	−8×°	57	−9
−24	2°	−50	8°	−56	9	−57
26	52	0	58	−6	59	−7
28	54	2°	60	−4×°	61	−5
−28	−2	−54	4°	−60	5	−61
32	58	6	64	0	65	−1
−32	−6	−58	0	−64	1	−65
−34	−8°	−60	−2	−66	−1	−67
38	64	12×°	70	6	71	5

这样看来，电动机似乎以采用奇数槽转子为好了，因为它不会产生同步附加转矩。如果单从消除同步附加转矩这一点来看，这确实是对的，但是我们"**必须学会全面地看问题，不但要看到事物的正面，也要看到它的反面。**"前面我们曾经分析过，奇数槽转子所产生的转子谐波与定子谐波两者次数相差1的较多，因此产生振动噪音的可能性比偶数槽转子大得多，这就是奇数槽转子的反面情况。所以实际选择槽配合时应该综合各方情况并针对改绕中的主要矛盾来决定，通常还是偶数槽转子为多。从本例的三种槽配合来看，也以选择36/32的槽配合为好。因为这时同步附加转矩不大，对电动机起动性能已无大的影响；而且因为是偶数槽，振动噪音也小。当然在一些谐波比较丰富的非正常相带绕组中，特别是改绕后试运转中已证明同步附加转矩比较严重时，就可以考虑采用奇数槽转子。

顺便指出一点，单速异步电动机几乎都采用60°相带的短距绕组，谐波影响较小，所以转子槽数几乎都是偶数的，以减小振动噪音。但是，有些早年生产的杂牌单速异步电动机也有用奇数槽转子的，改绕中可能会碰到。

2）选跨距为满距，即 $y=\tau$。从(8-5)式可知，此时

$$K_{y\nu}=\sin\frac{\nu' y}{\tau}90^\circ=\sin\nu' 90^\circ$$

因此，相对于基波的所有偶次谐波（ν' = 偶数），其短距系数都等于零，也就是说所有偶次谐波都将消失。如果某绕组方案在某个极数下其定、转子谐波之间的同次主要是由于定子绕组中的偶次谐波引起的，那末跨距选用该极数时的满距就可以消除该极数下的所有偶次谐波，也就可消除定、转子谐波的同次，同步附加转矩就跟着被消除。

仍以第九章方案13的四极为例，此时定、转子谐波的同次就是由于定子绕组中的偶次谐波(4、8、12、16、20次等)引起的。因此如果选择跨距为四极的满距即 $y=9$，则该绕组谐波就只有五、七、十一、十三、十七、十九等次，即只有10、14、22、26、34、38等次谐波，其中10、22、34等次为负(此时磁势曲线和60°相带绕组磁势曲线已一样，见图8-25)。此时定、转子谐波谱如表8-7所示。

槽配合为36/26，跨距 $y=9$ 时四极的谐波谱　　表8-7

定子谐波次数 (ν)	转子谐波次数 (μ)	
	36/26	
	$k=1$	$k=-1$
2	28	−24
−10	16	−36
14	40	−12
−22	4	−48
26	52	0
−34	−8	−60
38	64	12

由表可知槽配合同样为36/26，定、转子谐波之间已没有同次，同步附加转矩也就消失。

应该指出，跨距选为四极的满距虽然起到了有益的作用，但另一极数时的短距系数却会随之减小，从而使出力降低。所以对克服同步附加转矩来说，这个方法不是主要的。同时，如果定、转子谐波之间的同次并非由定子绕组中的偶次谐波引起，这个方法也就不适用了。

还须说明的是：跨距选满距时，定子齿谐波强度并没有削弱。同步附加转矩所以消失是因为和齿谐波相互作用的另一方谐波已消失。所以这和前面所说的不能用选择跨距的方法来削弱齿谐波强度的结论是一致的。

3．振动噪音的克服方法

根据前节分析可知，在绕组方案既定情况下，要减小振动噪音主要是选择适当的槽配合以避免定、转子谐波次数相差1。对于齿谐波来说，要避免其次数相差1，槽配合应满足不等式

$$\begin{cases} z_1-z_2\neq \pm 1 \\ z_1-z_2\neq \pm 2p\pm 1 \end{cases}$$

由于奇数槽转子可能产生较大的噪音，因此在不妨碍其他性能的条件下以选择偶数槽转子为好。

第五节　判断和克服谐波磁场影响的措施

在以上四节中我们分析了谐波磁场的产生、影响及其克服方法，现在我们再回到改绕实践中来，针对具体现象来确定措施。本章开头就提到改绕后电动机试运转时可能遇到以下现象：

1）低速潜行，不能起动到额定转速；

2）发生"死点"，转子在某些位置上起动不出；

3）起动、运转时有严重噪音。

综合以上四节，针对以上现象可提出如下措施：

1．低速潜行的克服措施

1）测出潜行的具体转速，判断产生原因。同步附加转矩和异步附加转矩都可能造成这一现象。但是同步附加转矩造

成的低速潜行其转速大致等于$\frac{6000}{z_2}$;异步附加转矩造成的低速潜行其转速决定于造成电动机转矩曲线凹陷的那个谐波次数ν,大致等于$\frac{3000}{\nu}$。所以遇到低速潜行现象,就应测出其具体转速,据此来判断潜行是由哪一种附加转矩造成的。

2) 如判明属异步附加转矩,可按式$\nu \approx \frac{3000}{\text{潜行转速}}$算出造成此现象的谐波次数,再根据(8-6)式选择适当跨距以削弱或消除之。

3) 如判明属同步附加转矩,则主要是定、转子的槽配合问题。可换一只不同槽配合的电动机再试验。

2. "死点"的克服措施

造成"死点"的原因主要也是定、转子间的槽配合问题。因此也应换一只不同槽配合的电动机再行试验。

槽配合究竟选择多少为宜,通常难以在事先作出完全正确的估计。本书附录一所列国产多速电动机技术数据以及第六章改绕举例中的一些数据可供读者改绕时参考。

另外,也可以采用以下方法作个粗略估计:画出所选绕组方案的磁势曲线,运用本章第二节介绍的看图识别法(根据曲线形状特点,多少槽一个波形周期,是否对称横轴等)大致估出磁势曲线所含定子谐波次数(如某一极数下该绕组三相不对称,则相应于该极数的谐波次数即有"+"、"-"两个分量)。再按照$\mu = kz_2 + \nu$算出转子谐波次数从而排出定、转子谐波谱。观察定、转子谐波之间同次的多少,特别是其中是否含有齿谐波,即可粗略估计所用槽配合产生同步附加转矩的可能程度。

当然,从预防观点上看,为了减少出现低速潜行和死点的

可能性，在选择绕组方案时就应该尽可能选择含谐波较少的方案。

3．噪音的克服措施

方法和本章第四节所述一样。

如果手头没有多余的不同槽配合的电动机可供挑选，而准备改绕的电动机功率对使用要求来说又比较富裕，则可以干脆牺牲一些出力，适当增加匝数以降低气隙磁密，使各次谐波磁场强度统统降低，谐波磁场产生的噪音自然也随之削弱。

在结束本章的时候，我们要再次强调：本章叙述的全部内容只是一些基本的定性分析，只能作一个参考。毛主席教导我们：“**实践是真理的标准**”。由于一般条件下对绕组方案很难作出它的详细的磁势谐波分析，并且槽配合问题本身是一个复杂的问题。因此对于一只改绕后的电动机，在既定的绕组方案、跨距、槽配合条件下，谐波磁场究竟有多大影响，只能由“实践”作最后的结论。在碰到问题，采取了某项措施之后，电动机性能究竟能改善到什么程度，也只能由“实践”作最后的结论。然而这样说并不排斥掌握一定理论的必要性，因为有了一定的理论作指导可以避免盲目的实践，特别是在遇到问题的时候它能指出克服的方向。

第九章　单绕组多速电动机绕组方案

由第六章我们可以知道，一只单速三相异步电动机欲改绕为单绕组多速电动机，首先要解决的问题就是要排出所需极数下的多速单绕组方案。如果在既定的定子槽数下排不出所需的绕组方案（这是完全有可能的），那末其余工作就没有必要再进行。

本书以前各章实际上已陆续介绍了一些多速单绕组方案。现再将笔者收集到的双速、三速、四速等 29 个单绕组多速电动机绕组方案集中在一起专门作为一章，以供读者参考。关于各个绕组方案的性能也已作了简要说明。这些绕组方案大多数均取自上海电器科学研究所 1970 年 12 月出版的《单绕组多速电动机专辑》，少数系笔者自行设计并经实践证明为可行的（未经试制的绕组方案文中有专门注明）。

方案1　2/4极(定子24槽)

本方案两极为60° 相带绕组，用庶极接法获得四极。两个极数的转向相反。

绕组系数：(跨距1—7)

两极——$K_d=0.957$　$K_y=0.707$　$K_{dy}=0.677$

四极——$K_d=0.836$　$K_y=1$　$K_{dy}=0.836$

联结方式：

较多采用2Y/△，引出线6根。要求恒功率可采用2Y/2Y 接法，引出线9根。

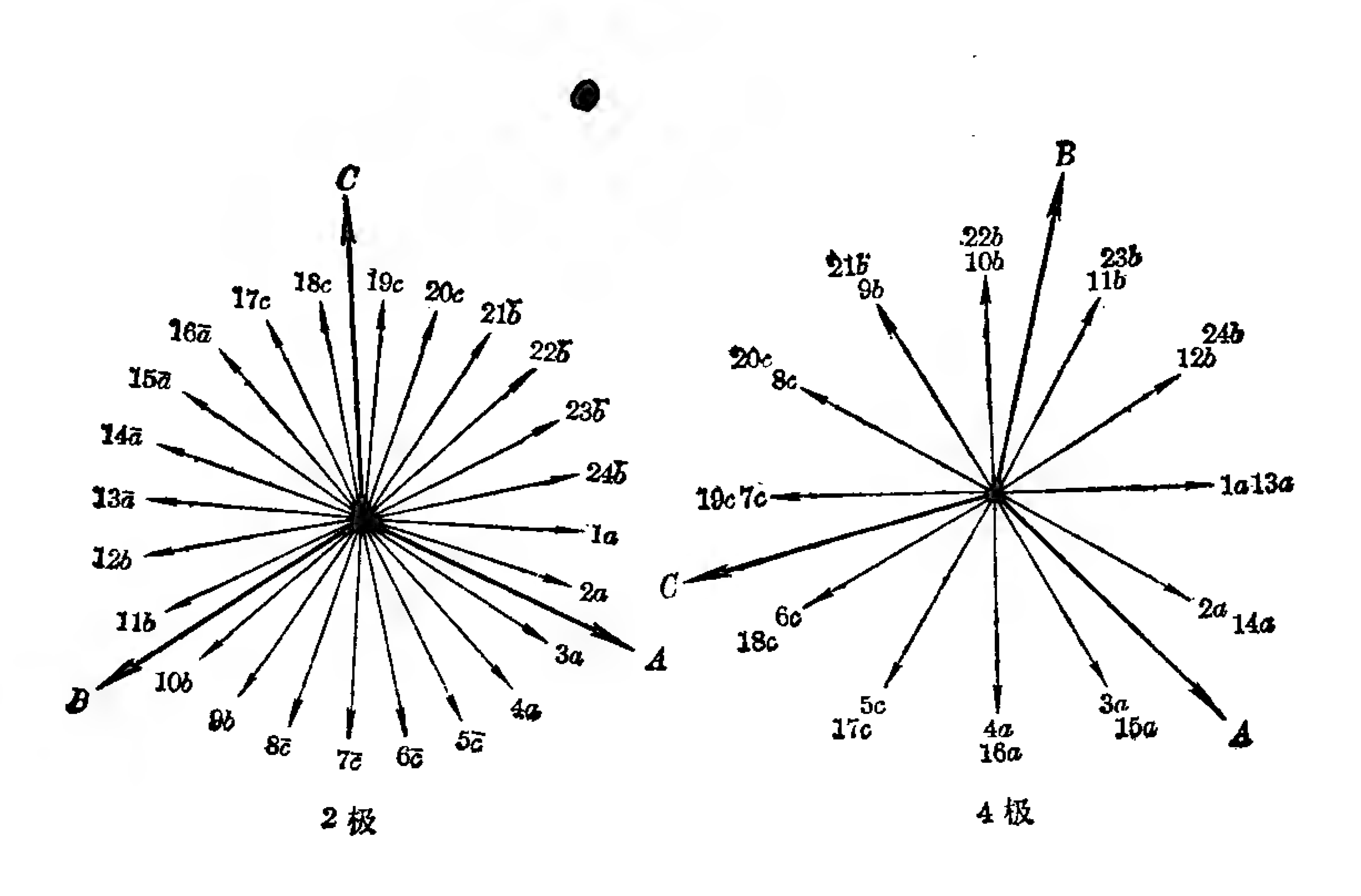


图　9-1　　　　图、9-2

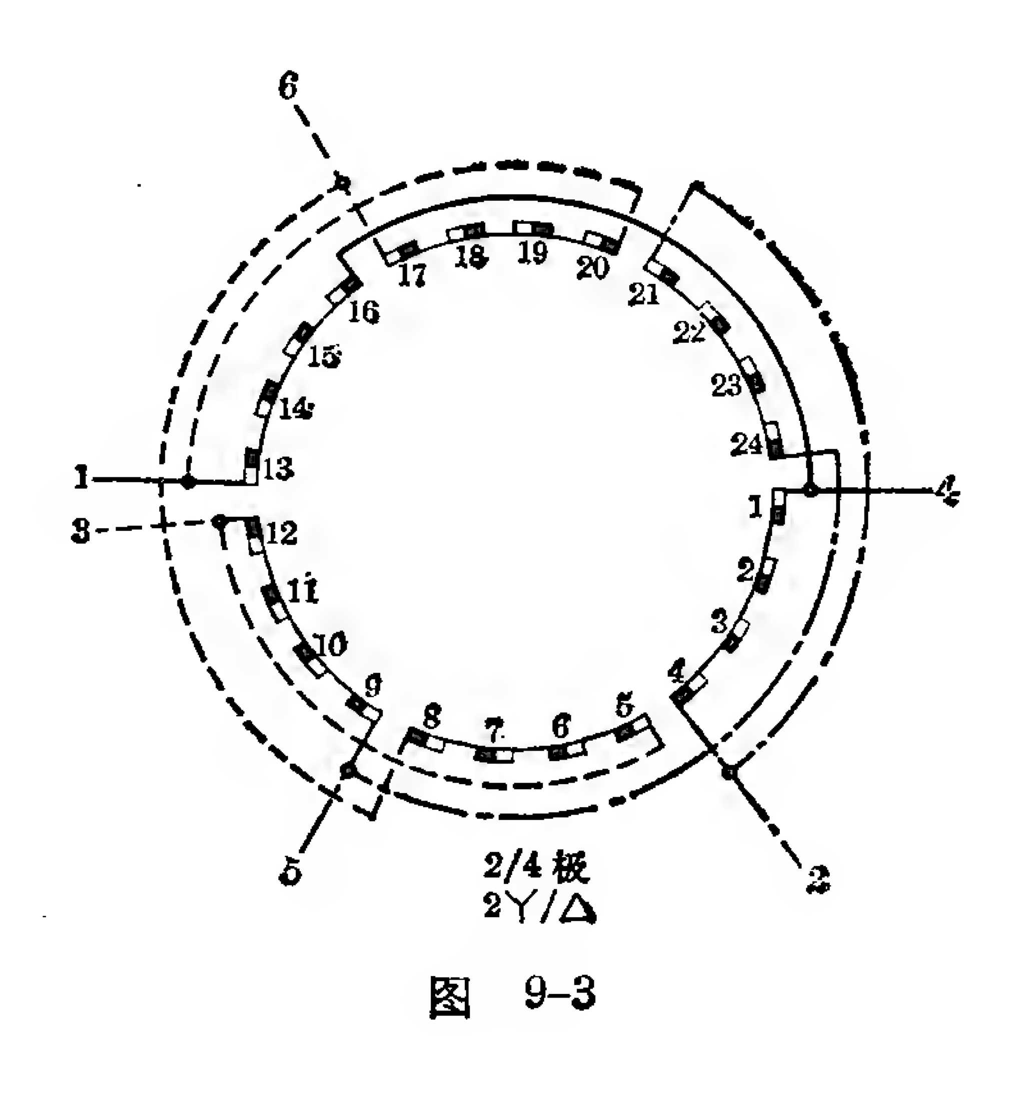

6
17
18
19
20
21
16
22
15
23
14
24
1
13
4
1
3
12
2
11
3
10
4
9
8
7
6
5
5
2
2/4 极
2Y/△

图 9-3

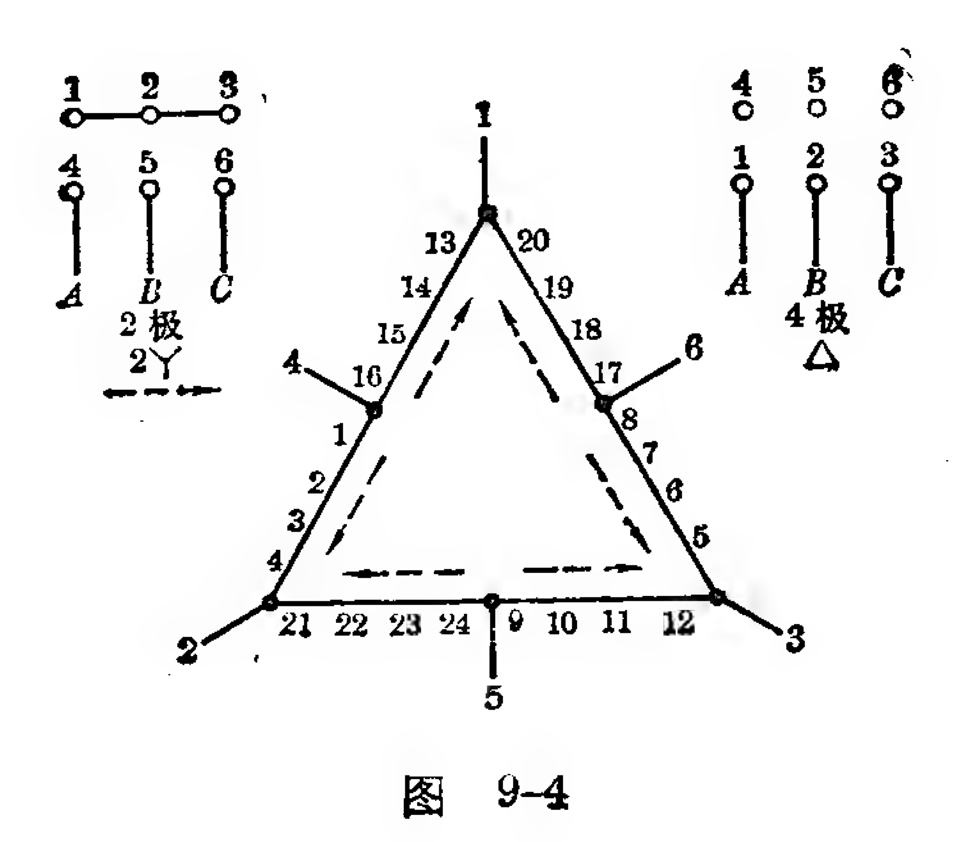

1 2 3
4 5 6
A B C
2 极
2Y
1
13 20
14 19
15 18
4 16 17 6
1 8
7
2 6
3 5
4
2 21 22 23 24 9 10 11 12 3
5
4 5 6
1 2 3
A B C
4 极
△

图 9-4

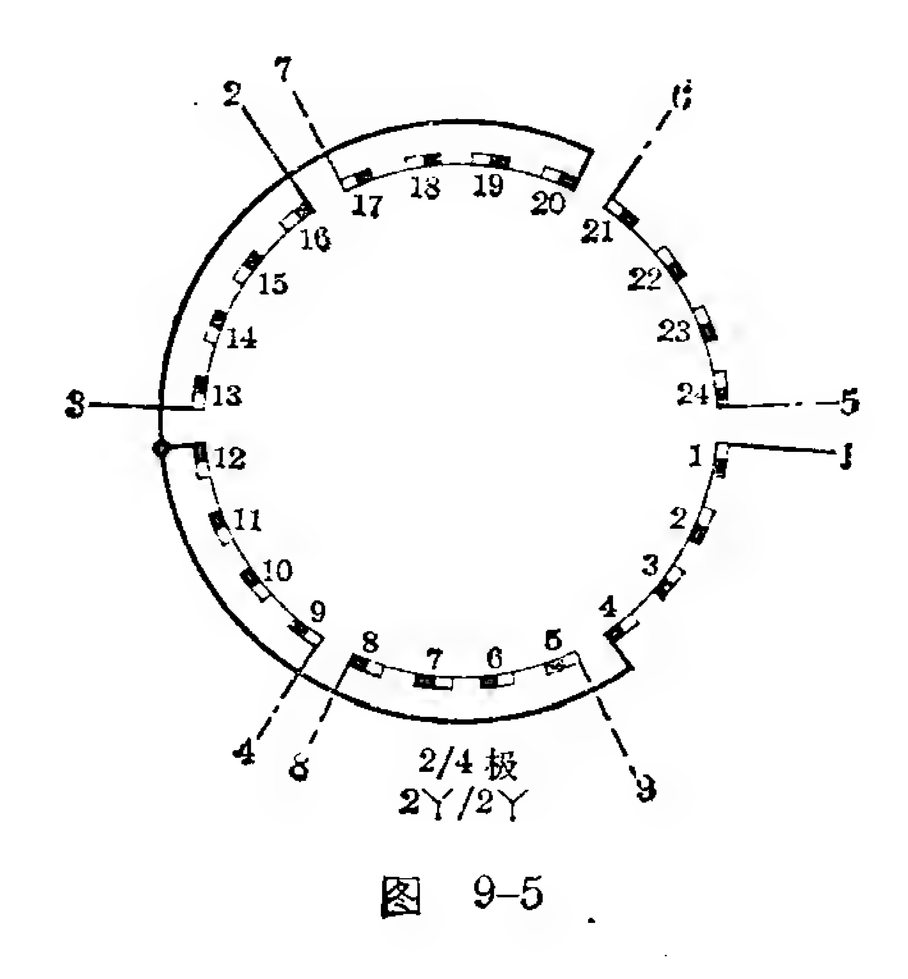


图 9-5

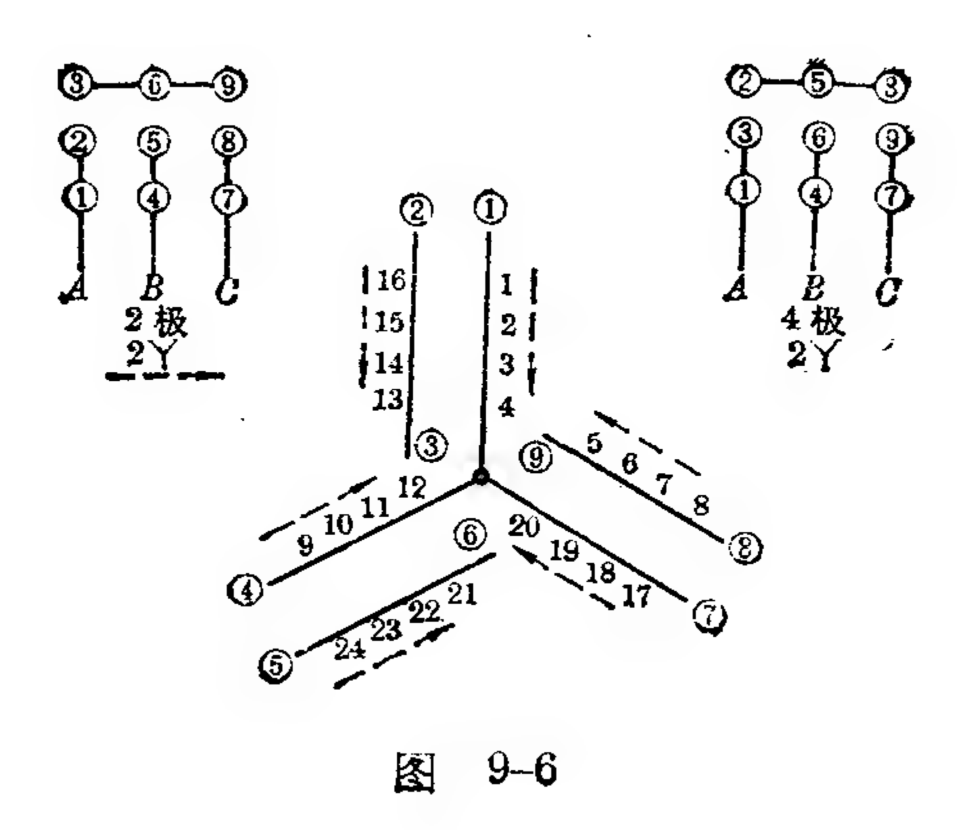


图 9-6

方案 2　2/4 极(定子 36 槽)之一

本方案两极为 60° 相带绕组，用庶极接法获得四极。两个极数的转向相反。

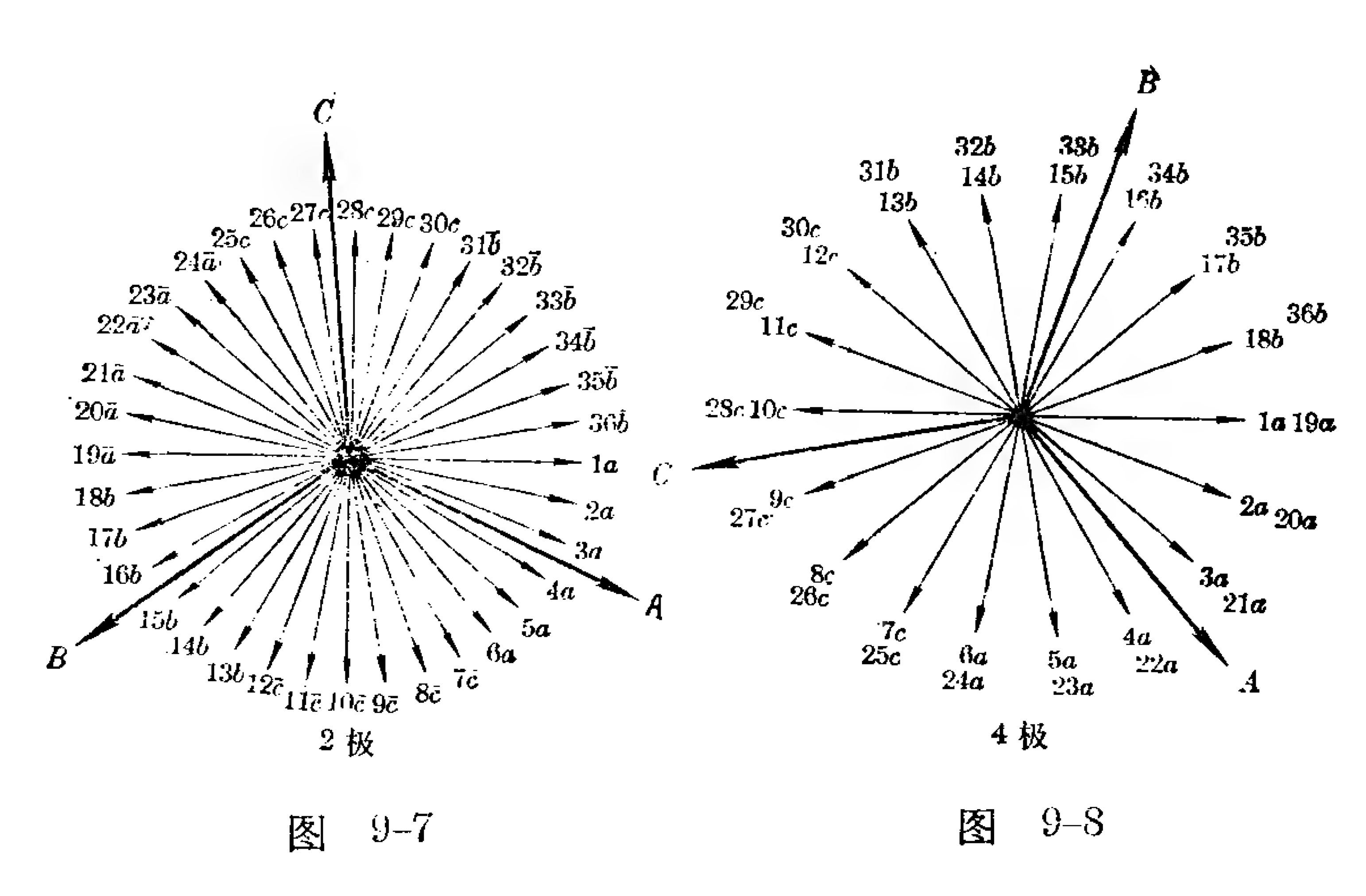
绕组系数：(跨距 1—10)

两极——$K_d=0.956$　$K_y=0.707$　$K_{dy}=0.676$

四极——$K_d=0.83$　$K_y=1$　$K_{dy}=0.83$

联结方式：

同方案 1。



2 极

图 9-7

4 极

图 9-8

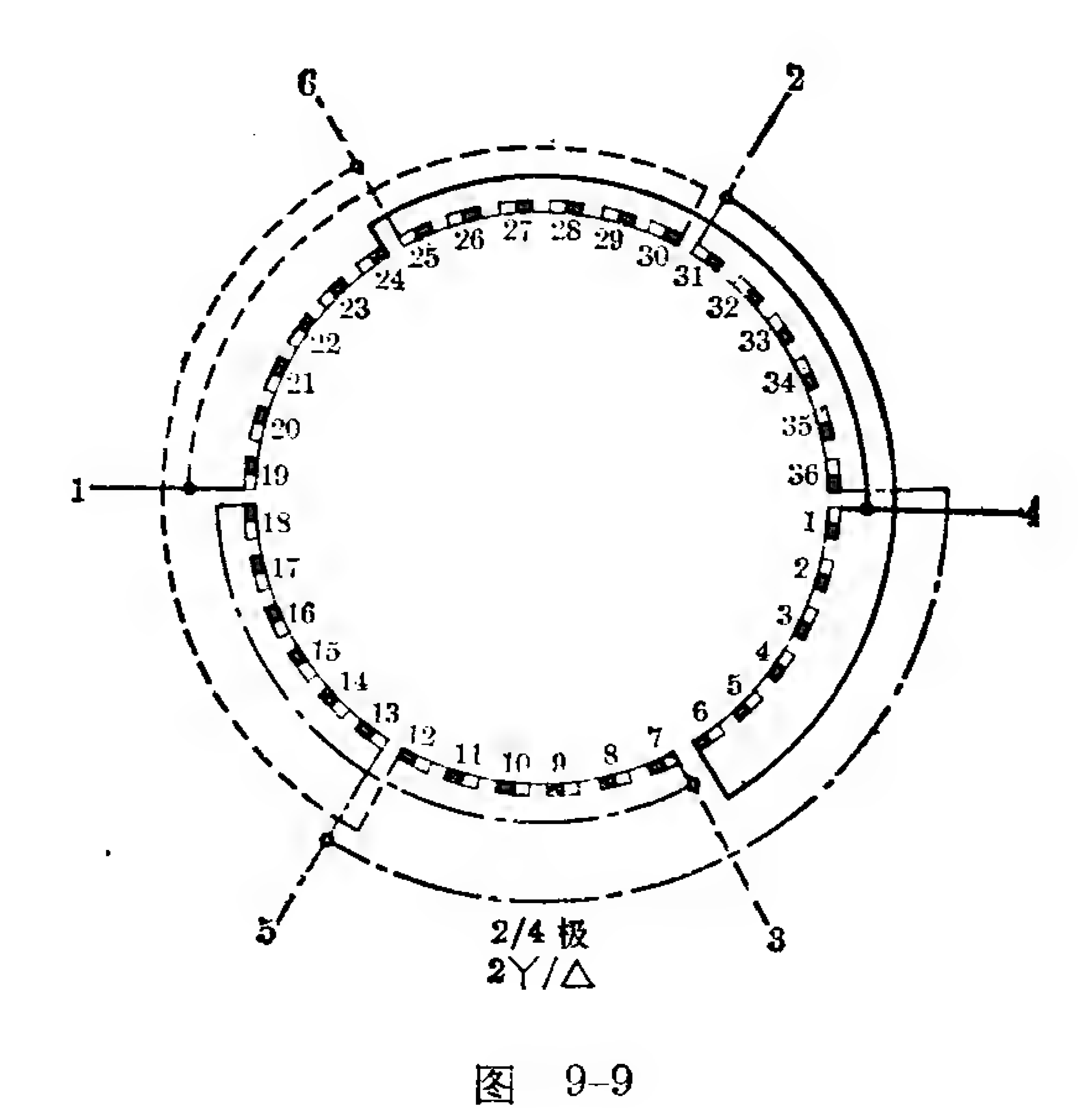


图 9-9

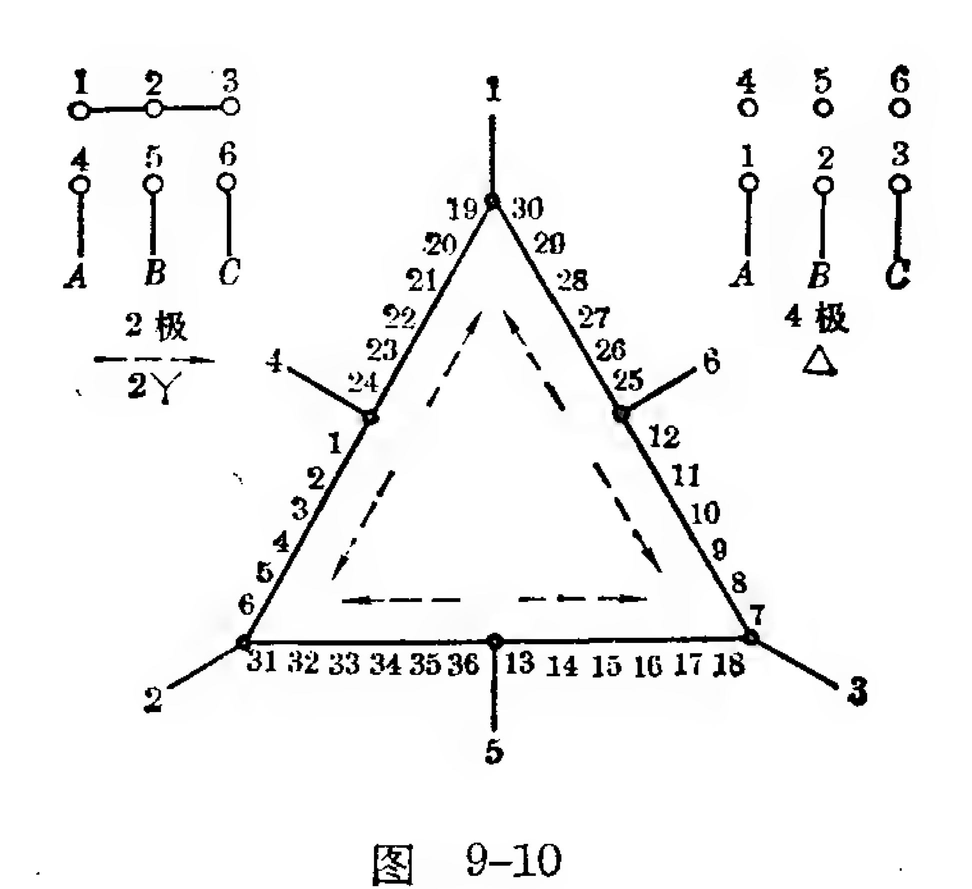


图 9-10

方案3 2/4极(定子36槽)之二

本方案系用换相法变极，并采用$\triangle$接法，因而绕组系数较高，适用于要求出力较高的恒功率场合。两个极数时的转向相同。

绕组系数：(跨距1—10)

两极——$K_{dY}=0.981$ $\quad K_y=0.707\quad$ $K_{dyY}=0.694$

$K_{d\triangle}=0.966$ $\quad\quad\quad\quad\quad$ $K_{dy\triangle}=0.683$

四极——$K_{dY}=0.925$ $\quad K_y=1\quad$ $K_{dyY}=0.925$

$K_{d\triangle}=0.911$ $\quad\quad\quad\quad\quad$ $K_{dy\triangle}=0.911$

联结方式：

$\triangle/\triangle$，引出线9根。

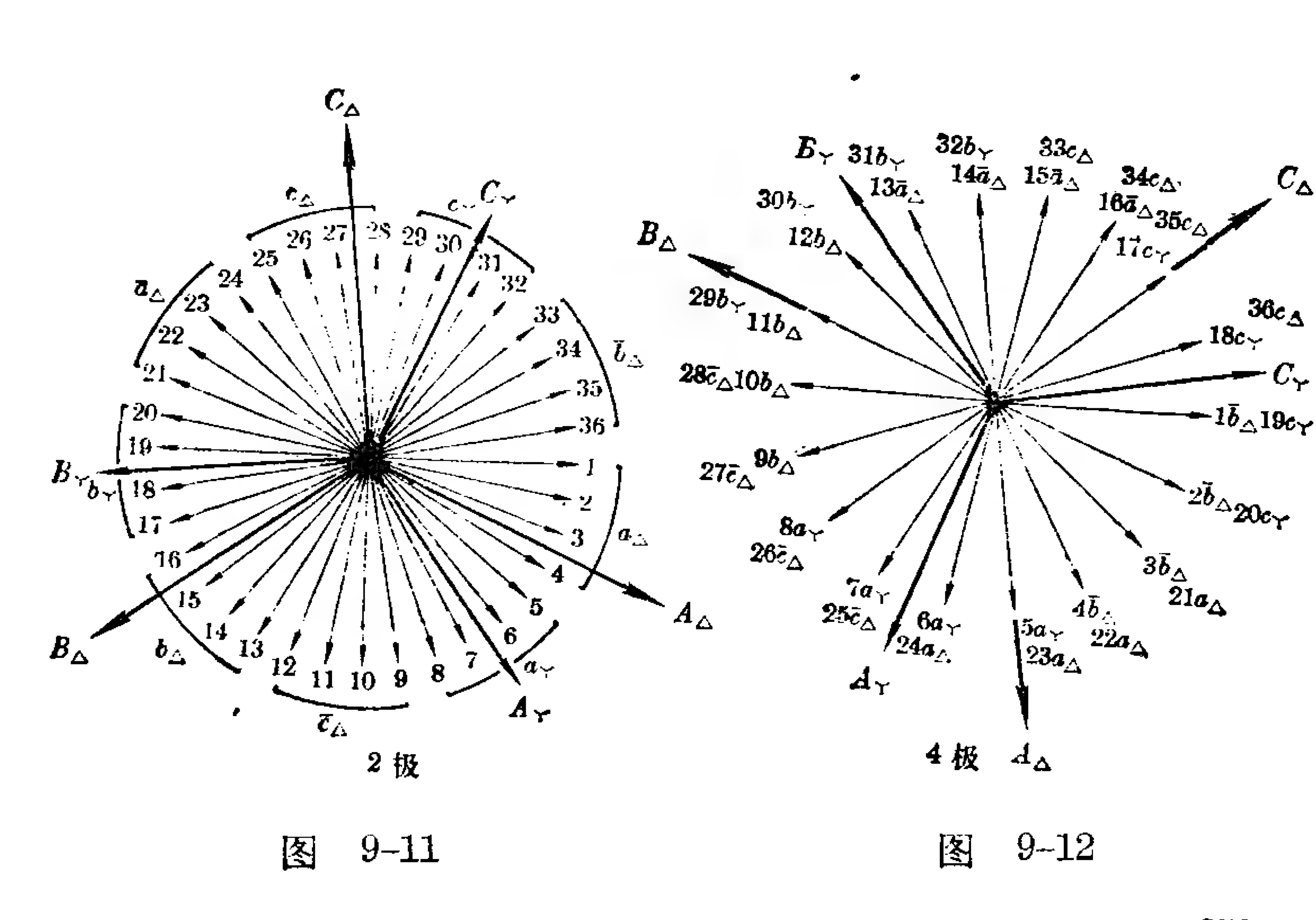


图 9-11 $\qquad\qquad$ 图 9-12

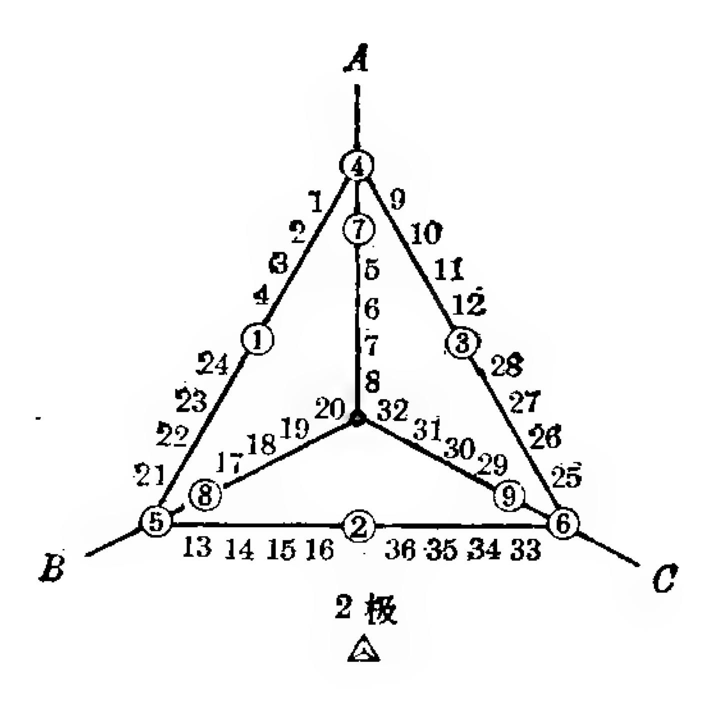


图 9-13

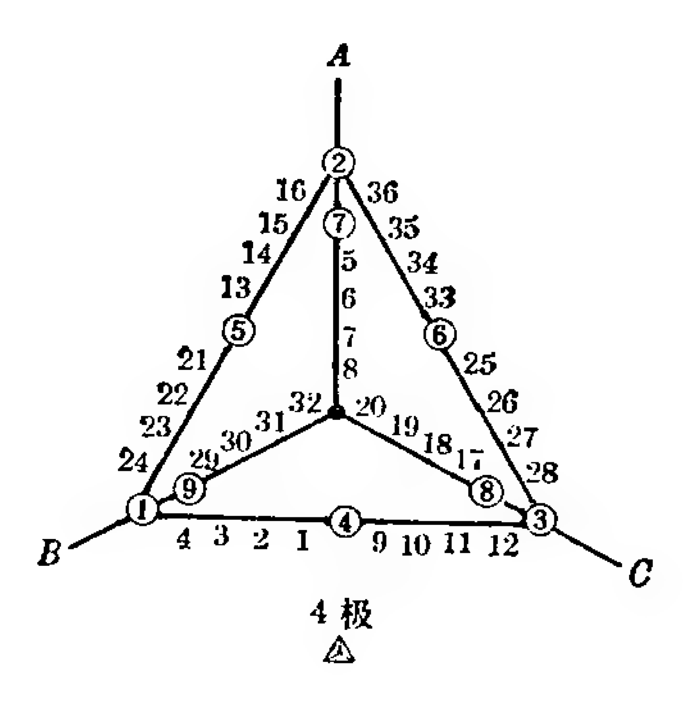


图 9-14

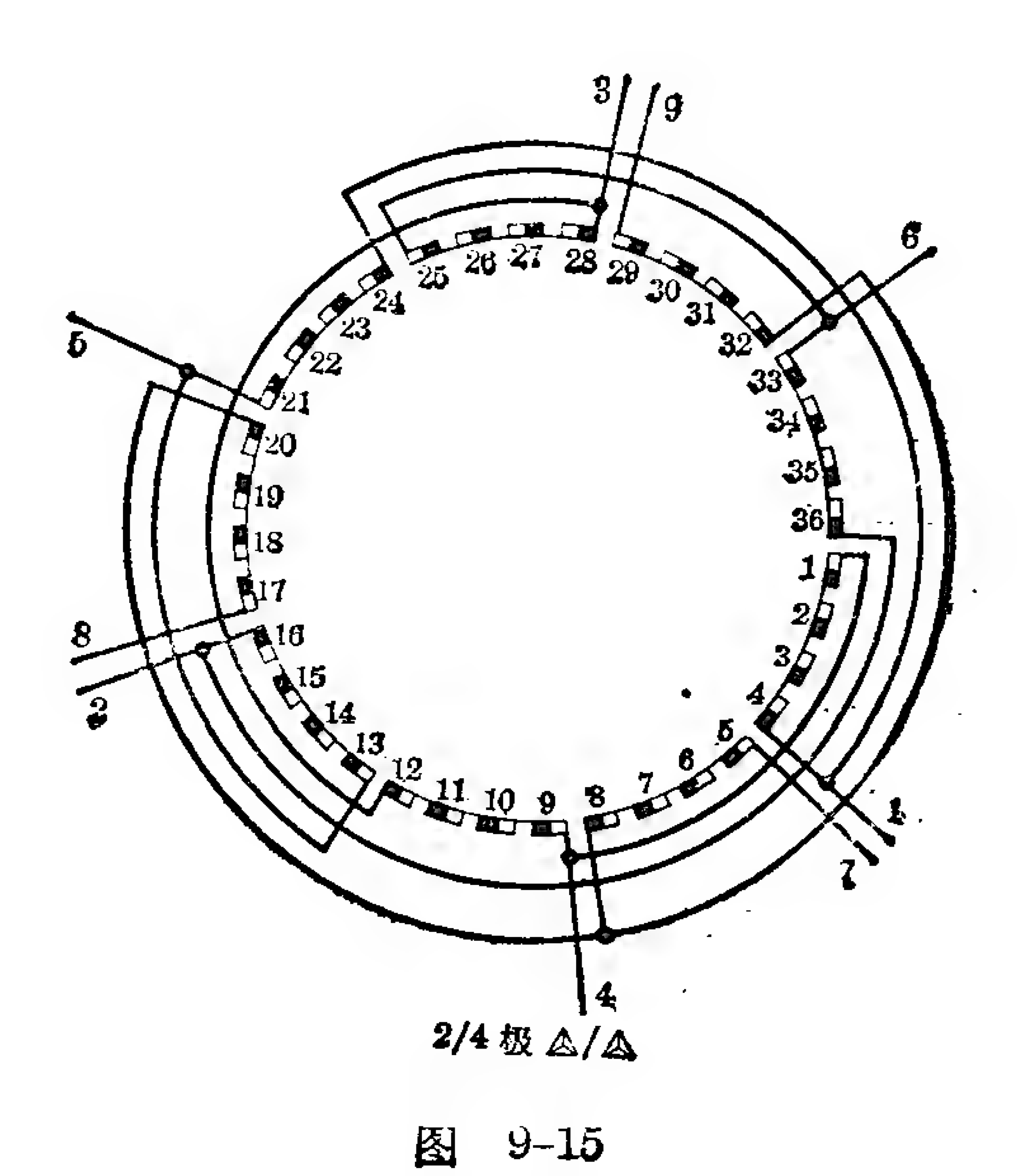


图 9-15

方案 4　4/8 极(定子 36 槽)

本方案为反转向方案。四极为 60° 相带绕组，用庶极接法获得八极。

绕组系数：(跨距 1—6)

四极——$K_d=0.96$　$K_y=0.766$　$K_{dy}=0.735$

八极——$K_d=0.844$　$K_y=0.985$　$K_{dy}=0.831$

联结方式：

2Y/△，引出线 6 根。

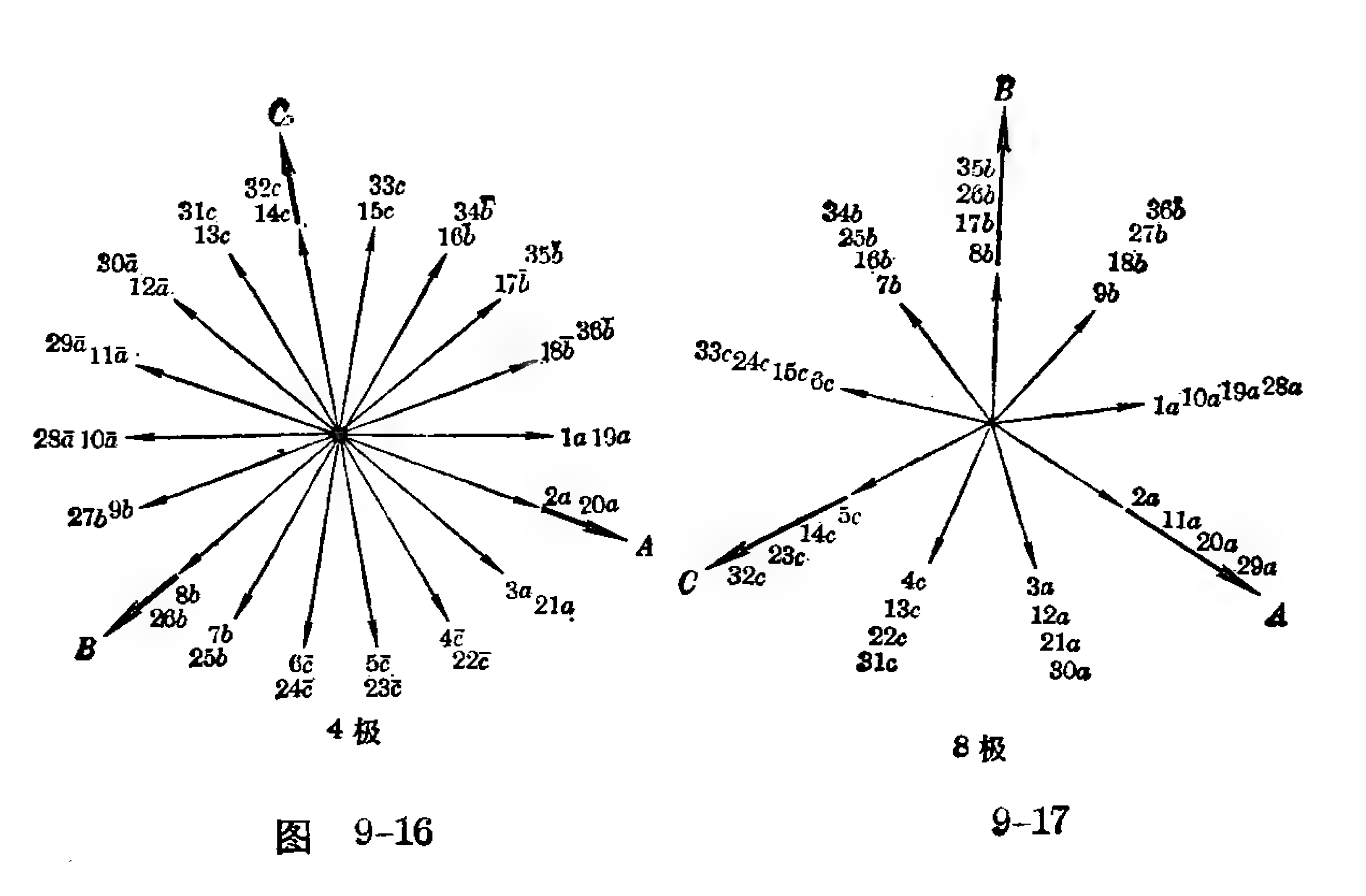


图 9-16　9-17

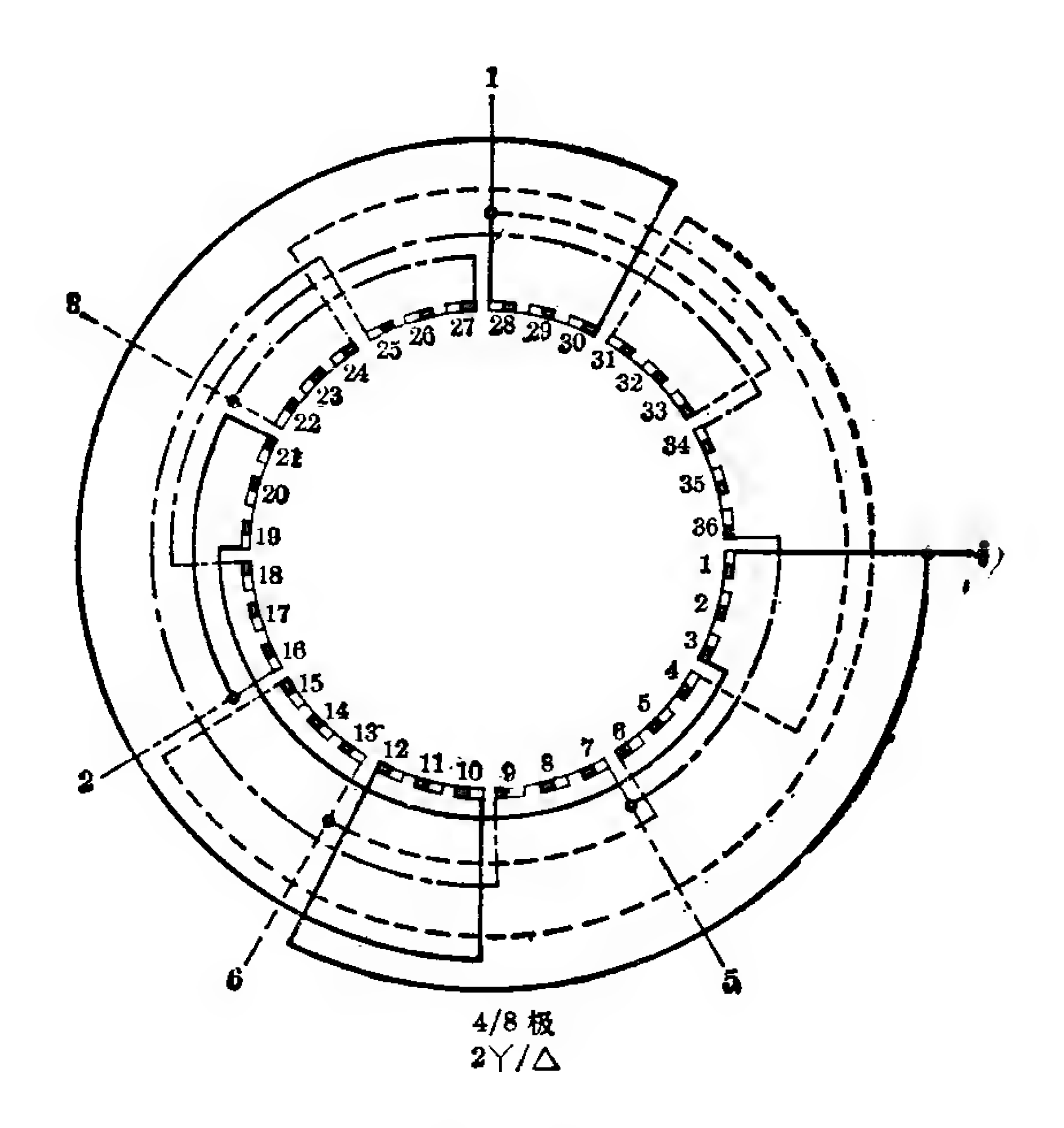


图 9-18

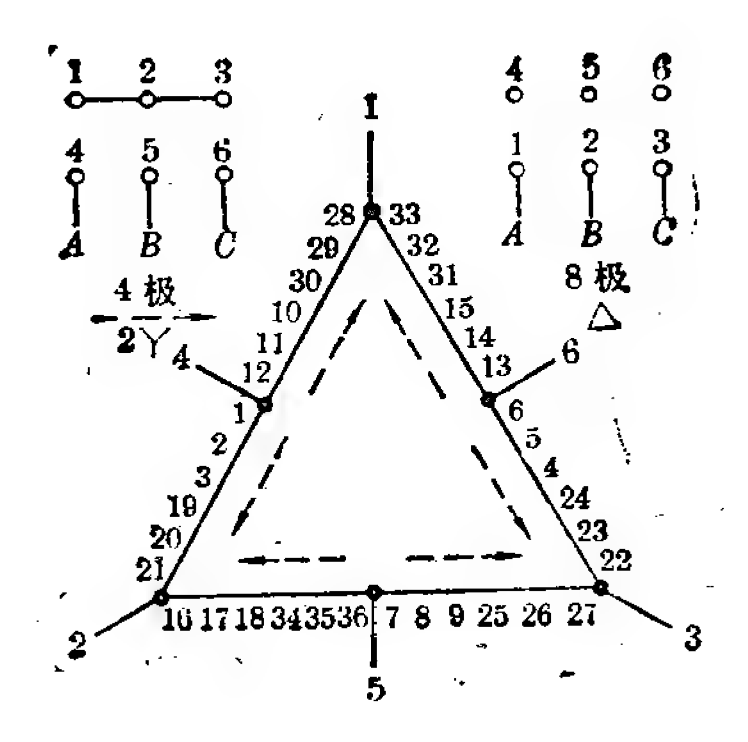


图 9-19

方案5　2/8极(定子36槽)之一

本方案为不规则分布绕组，两个极数的转向相同。长跨距时两个极数的绕组系数较高，并较接近。短跨距时，两极的绕组系数较低，起动可能困难。未经试制。

绕组系数：

	K_{d2}	K_{y2}	K_{dy2}	K_{d8}	K_{y8}	K_{dy8}
$y=5(1—6)$	0.82	0.423	0.347	0.83	0.985	0.82
$y=6(1—7)$	0.82	0.5	0.41	0.83	0.866	0.72
$y=14(1—15)$	0.82	0.94	0.77	0.83	0.985	0.82
$y=15(1—16)$	0.82	0.966	0.79	0.83	0.866	0.72

联结方式：

2Y/Y，引出线6根。要求恒转矩可采用2△/Y，引出线8根。

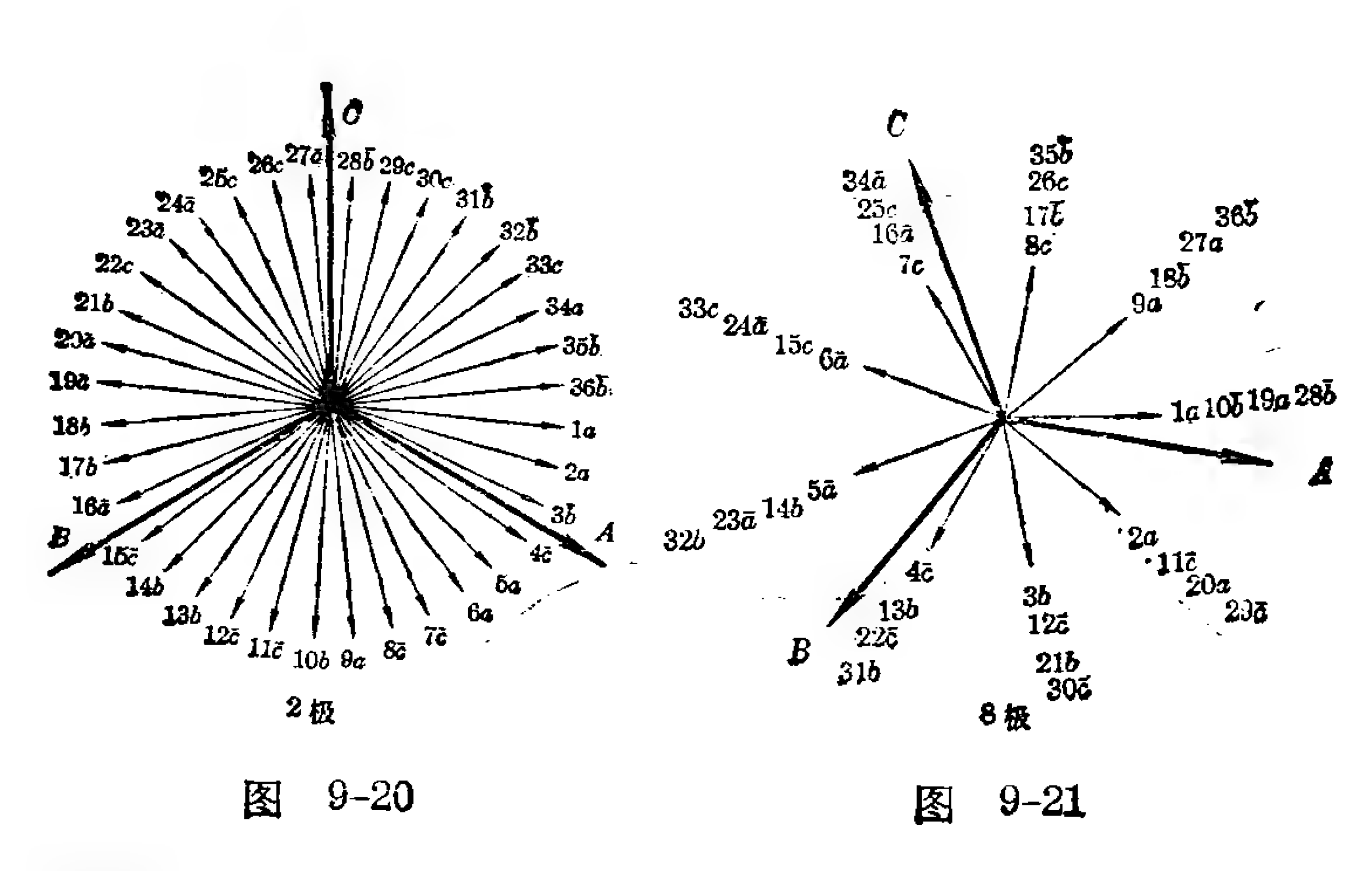


图　9-20　　　　图　9-21

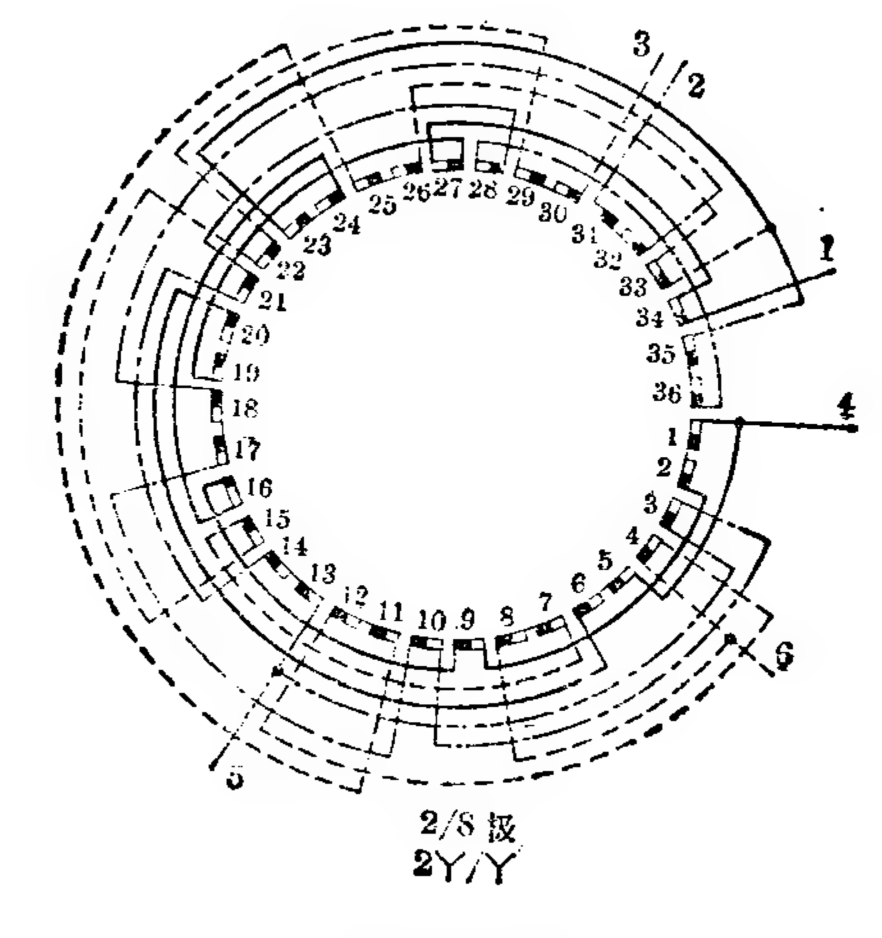


图 9-22

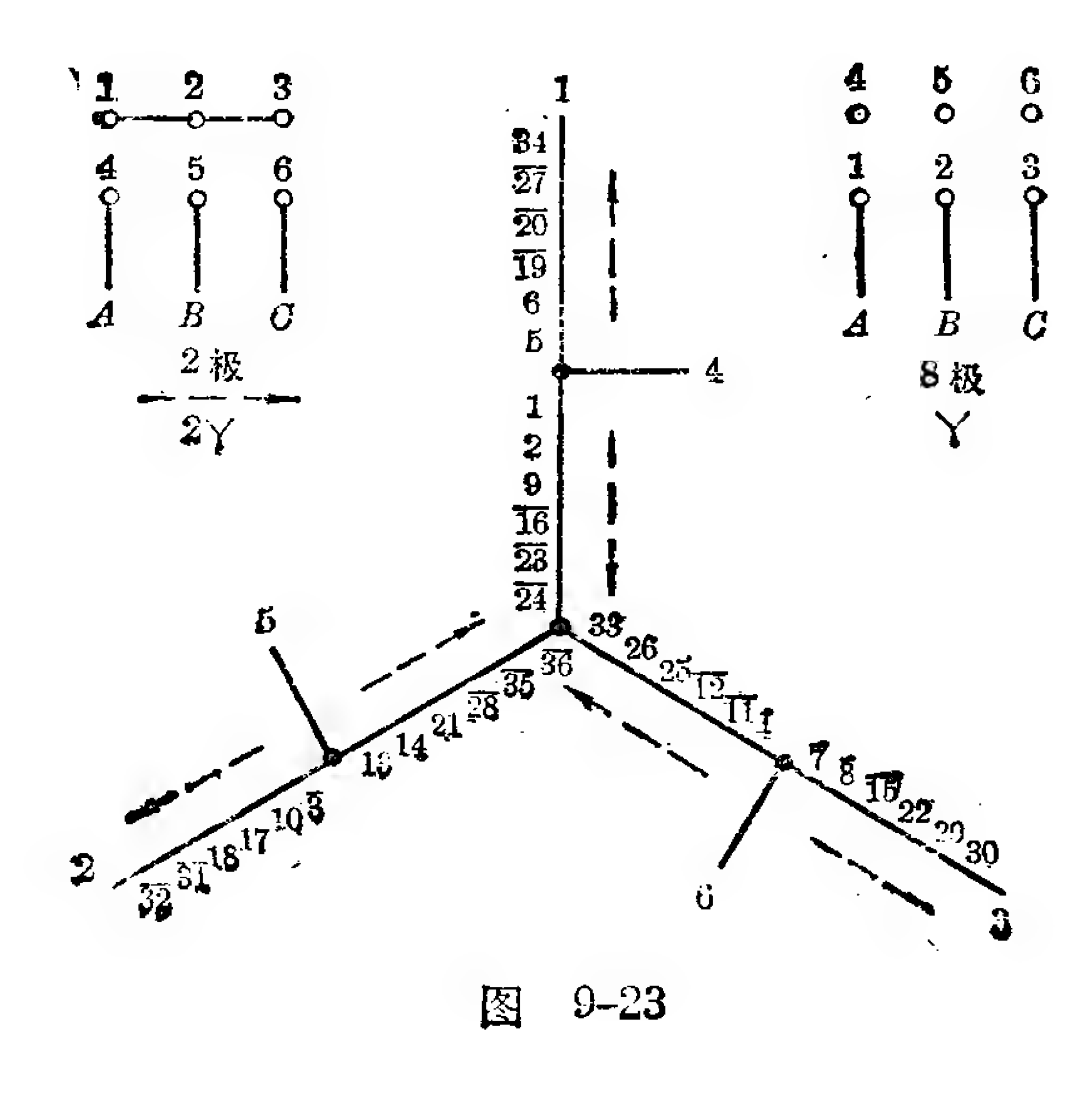


图 9-23

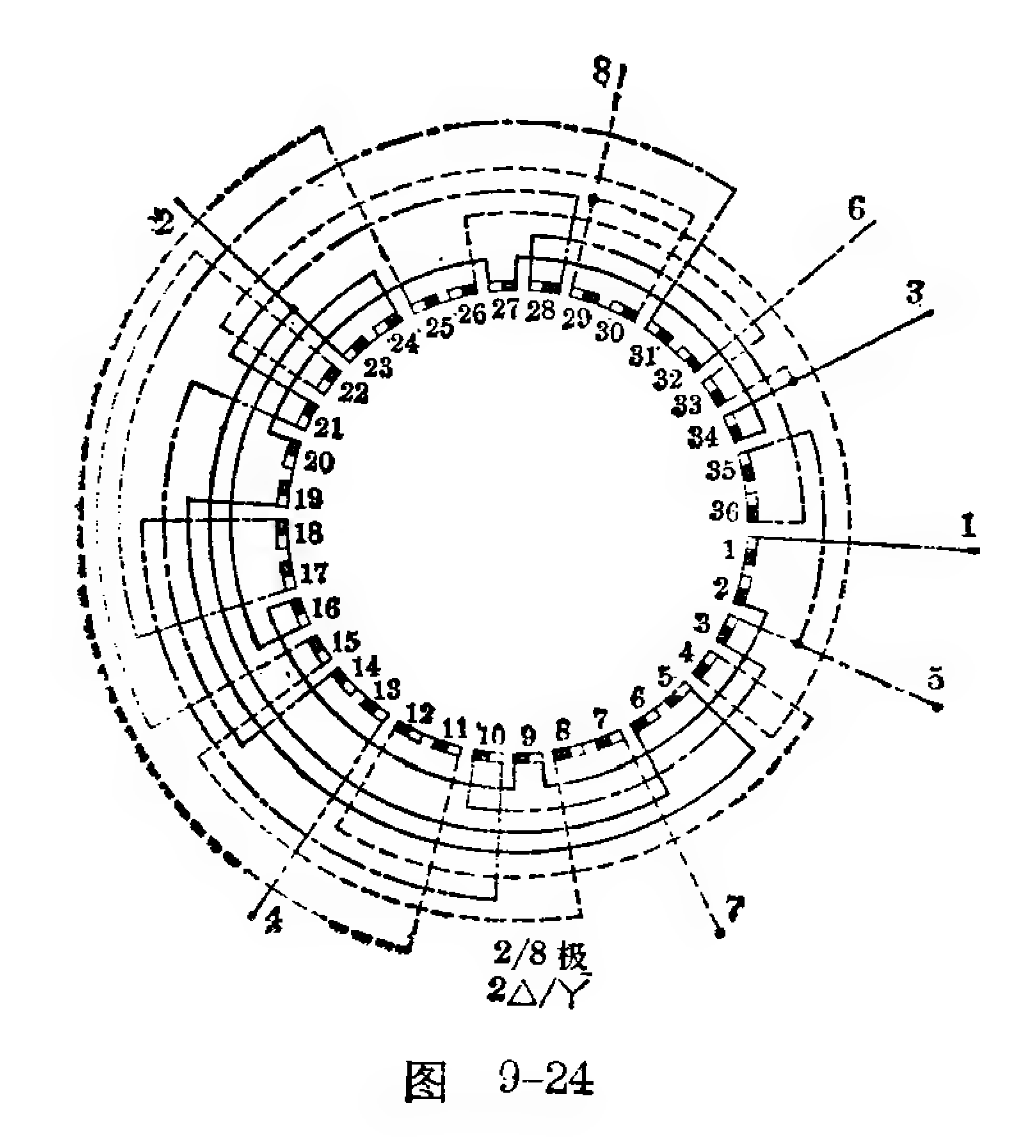


图 9-24

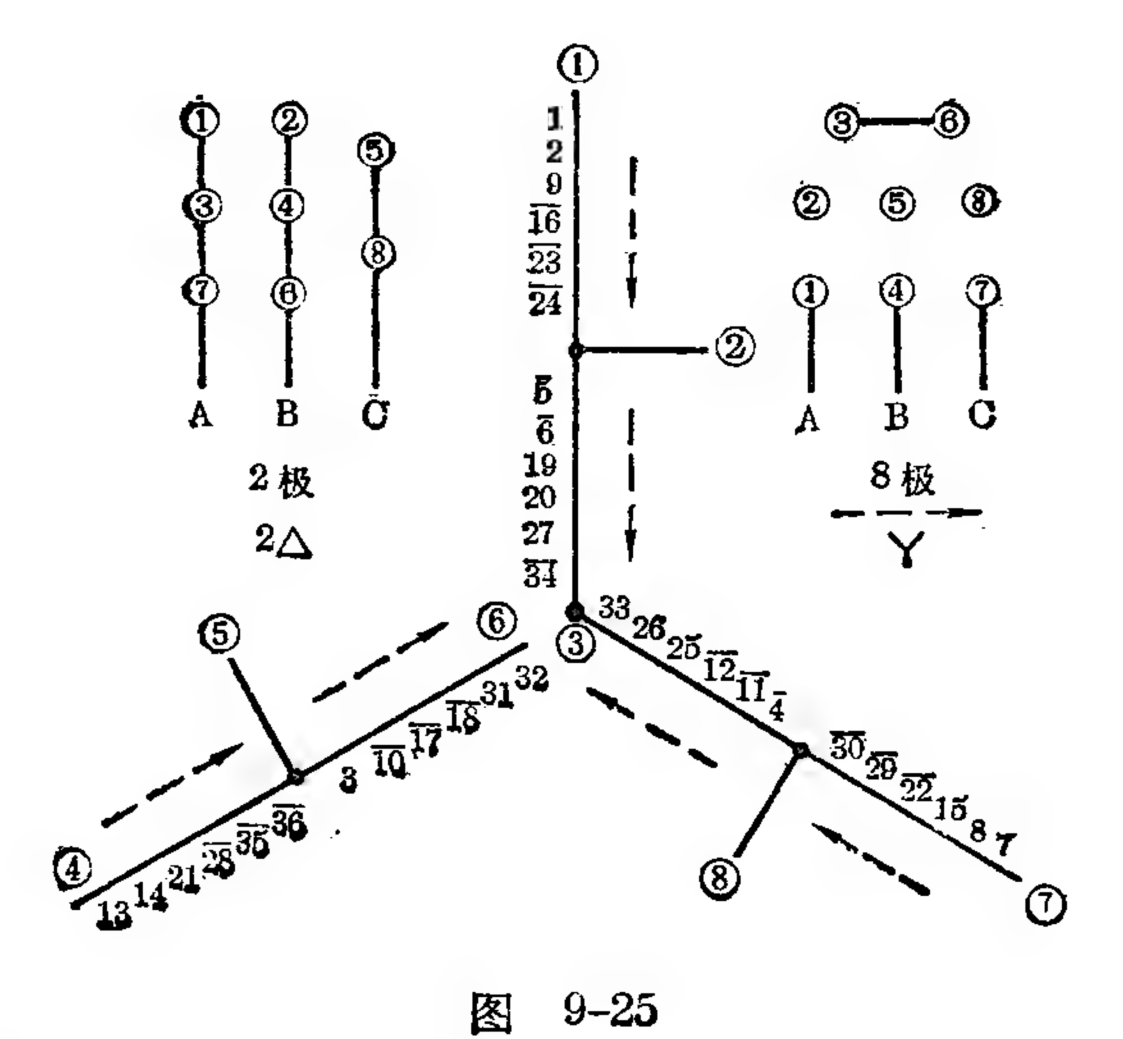


图 9-25

方案 6　2/8 极(定子 36 槽)之二

本方案八极时的每相矢量分布为 2 4 4 2，反向法得两极。两个极数的转向相同。

绕组系数：(跨距 1—16)

两极——$K_d=0.765$　$K_y=0.966$　$K_{dy}=0.74$

八极——$K_d=0.945$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.82$

联结方式：

同方案 5。

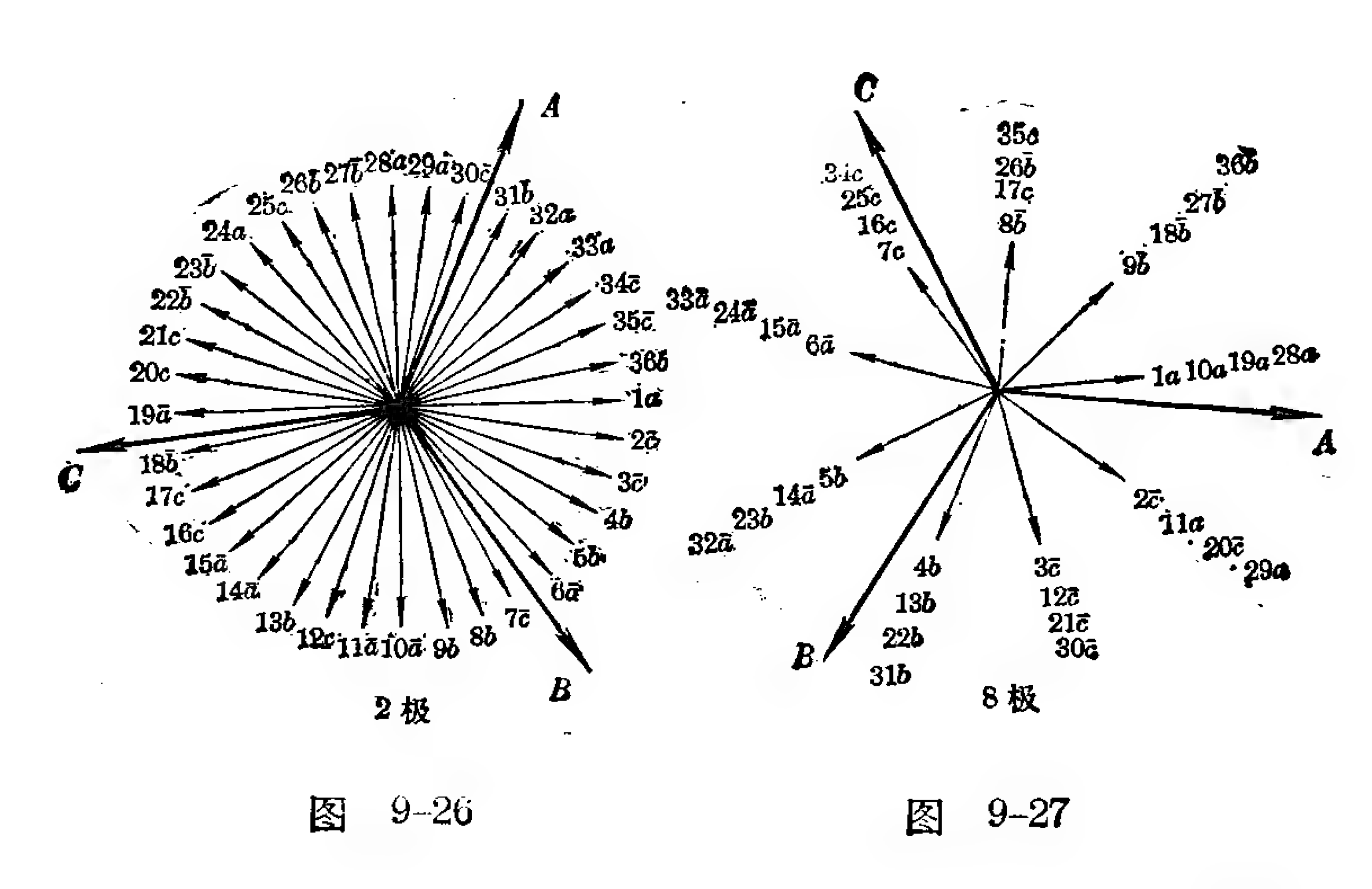


图　9-26　　　　图　9-27

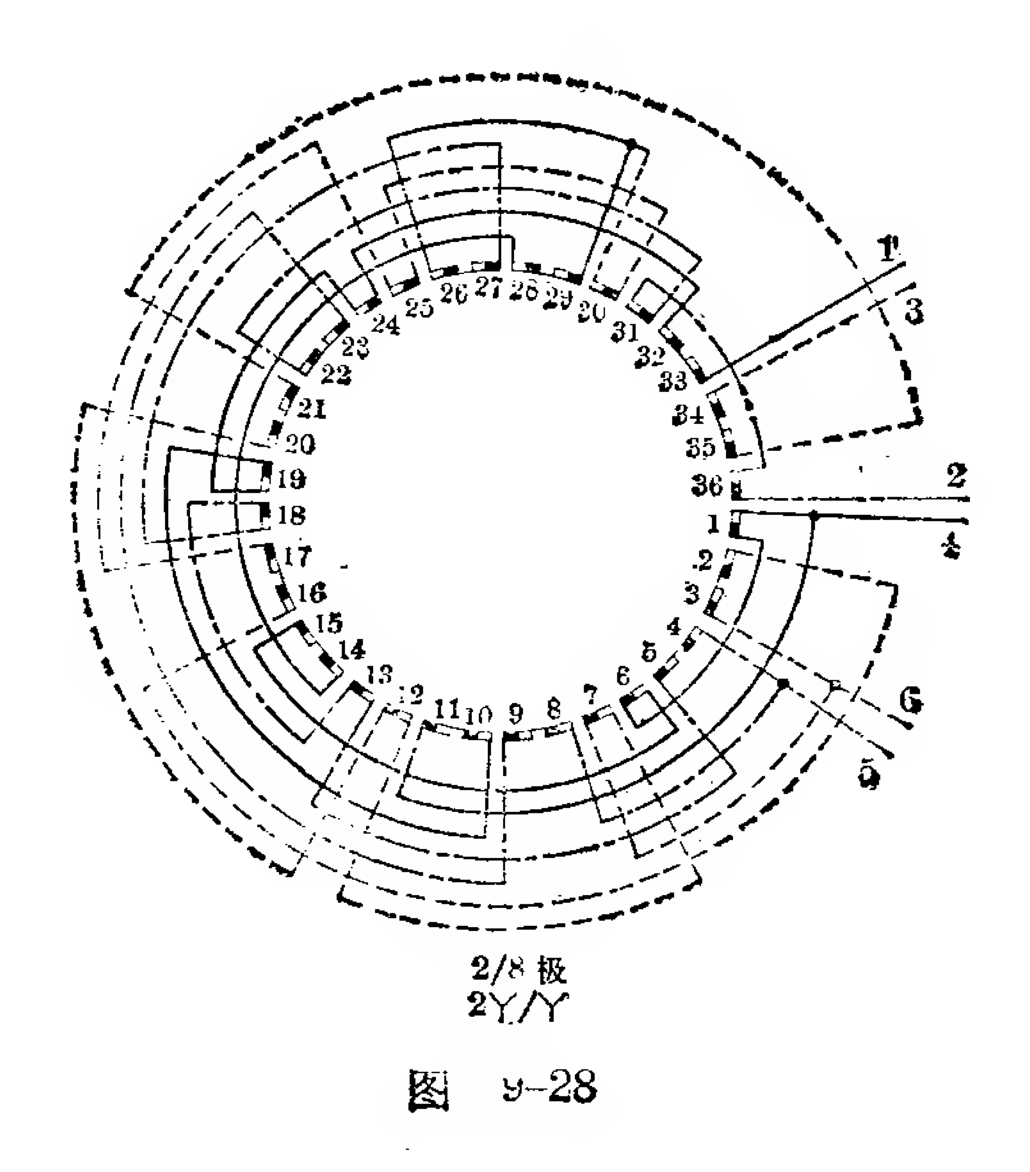


图 9-28

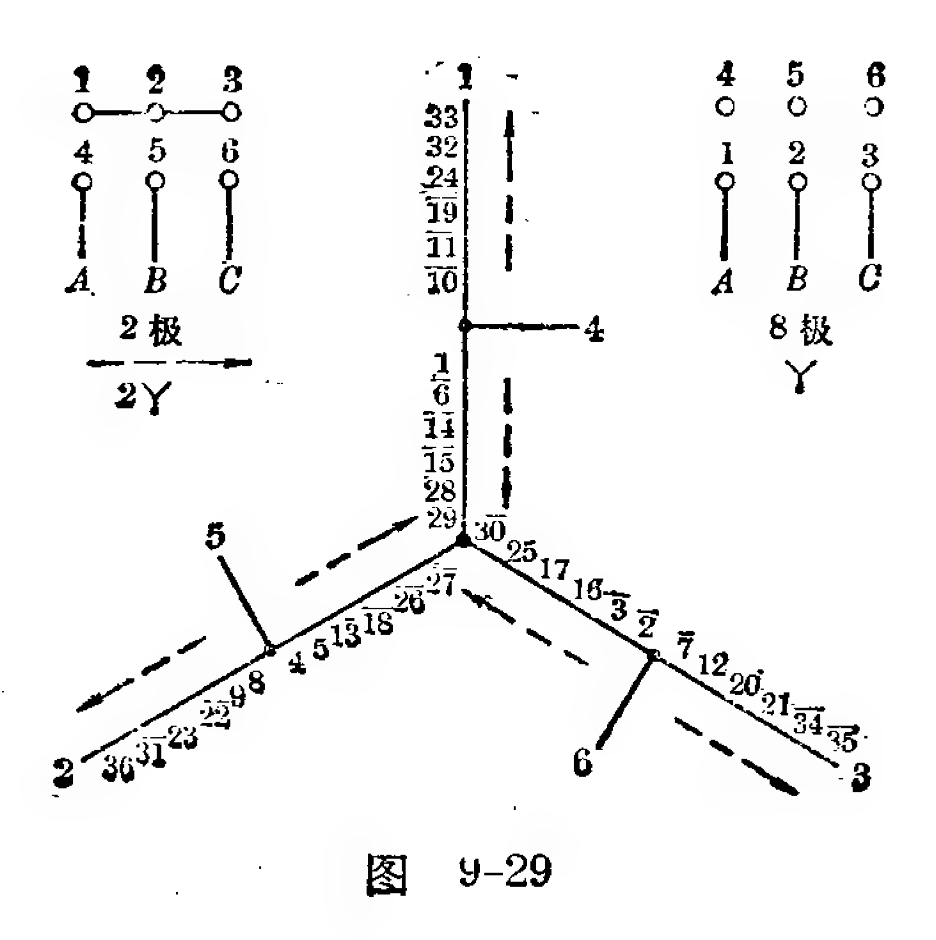


图 9-29

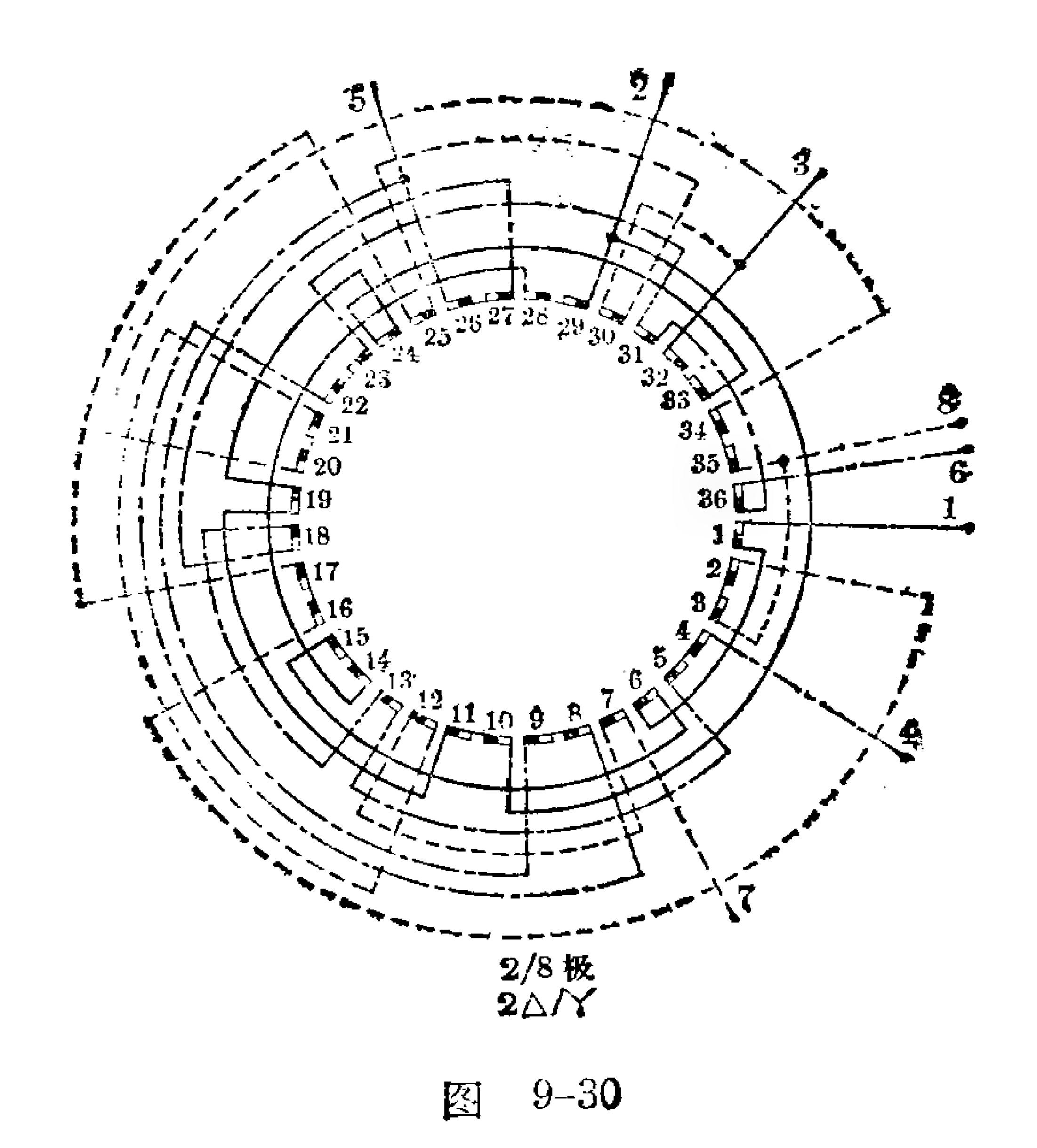


图 9-30

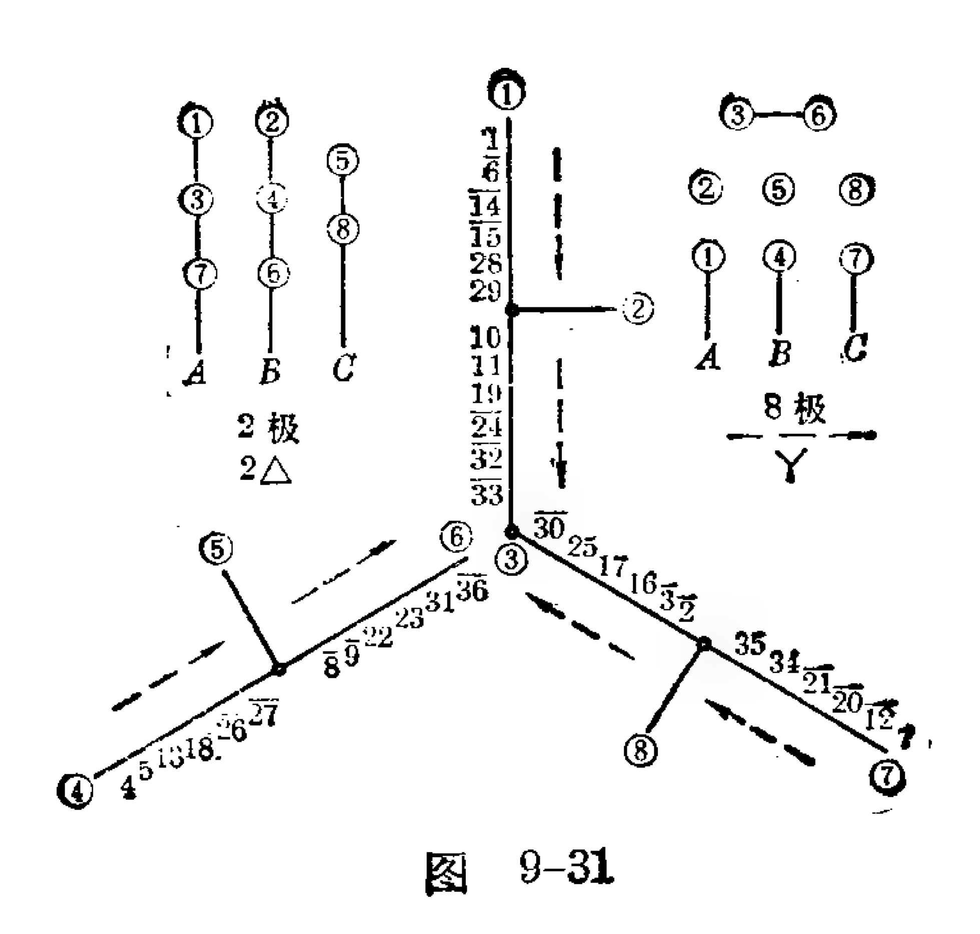


图 9-31

方案 7　2/8 极(定子 36 槽)之三

本方案八极为 12121212 分布的分数槽绕组，反向法得两极。两个极数的转向相同。

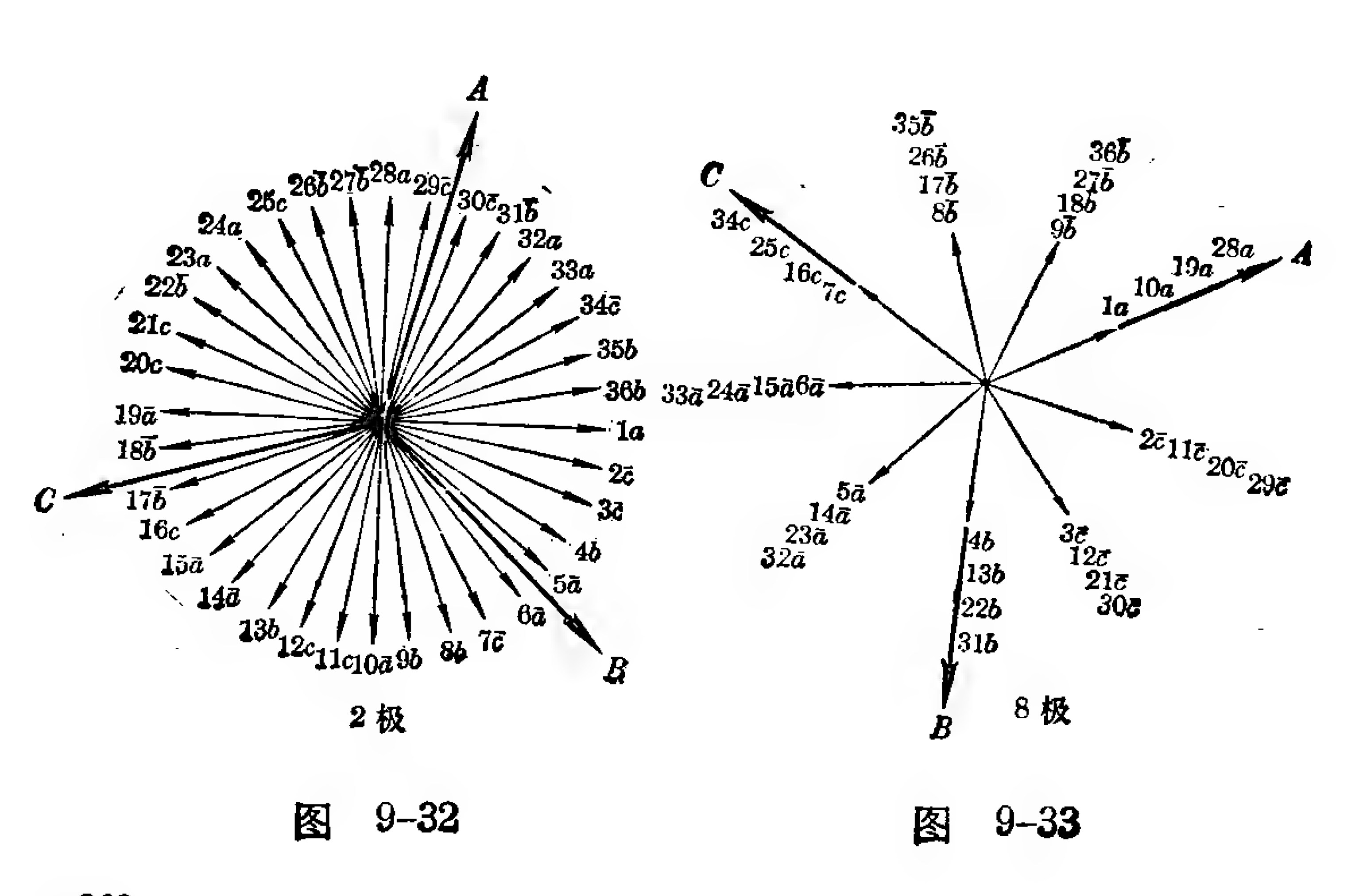
绕组系数：(跨距 1—16)

两极——$K_d=0.66$　$K_y=0.966$　$K_{dy}=0.638$

八极——$K_d=0.96$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.831$

联结方式：

同前。



2 极　　8 极

图　9-32　　图　9-33

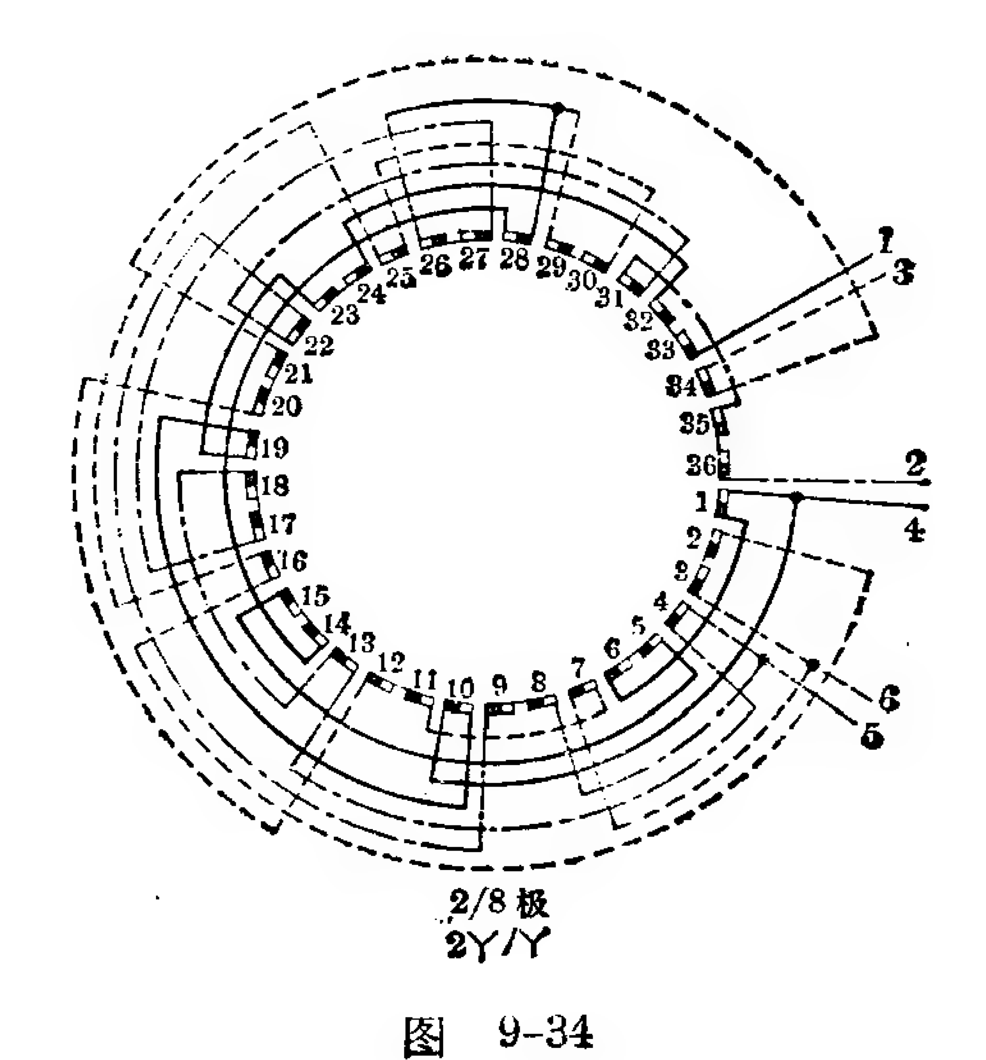


图 9-34

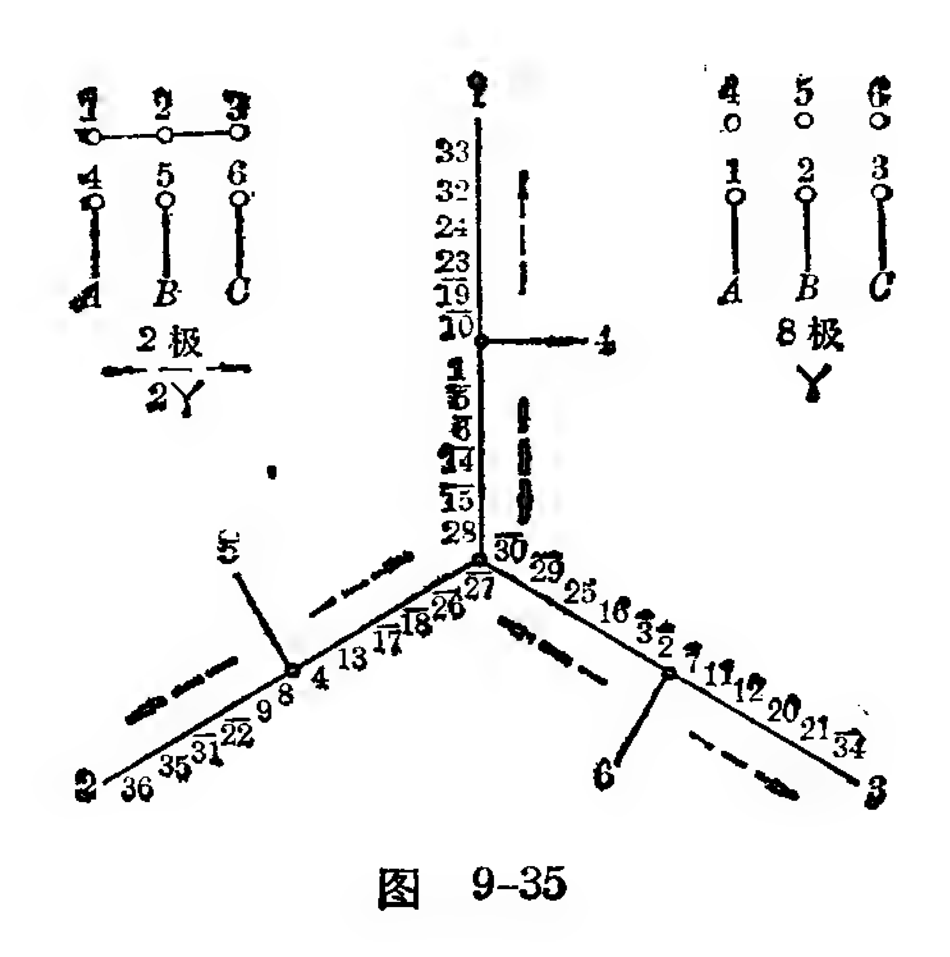


图 9-35

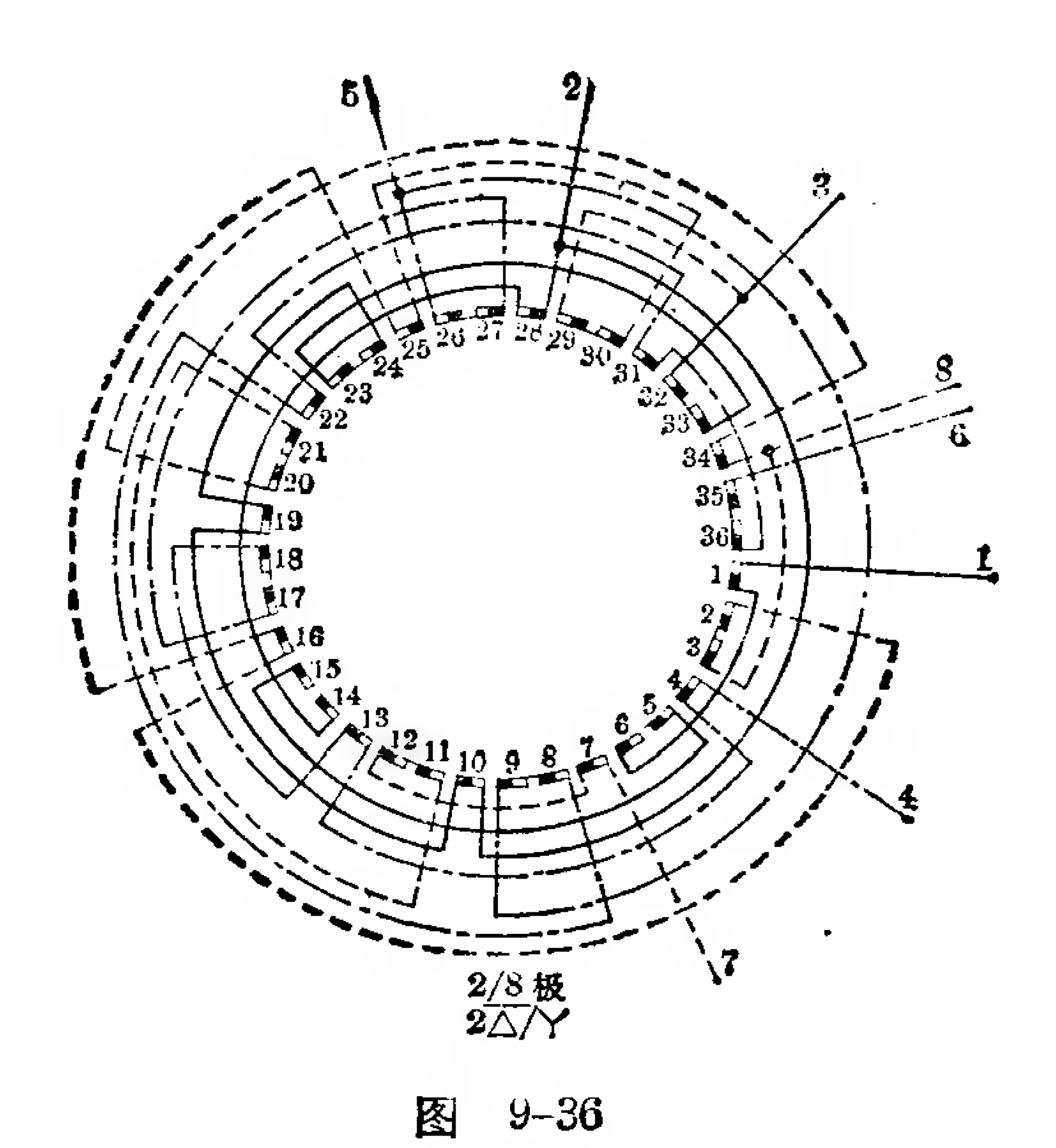


图 9-36

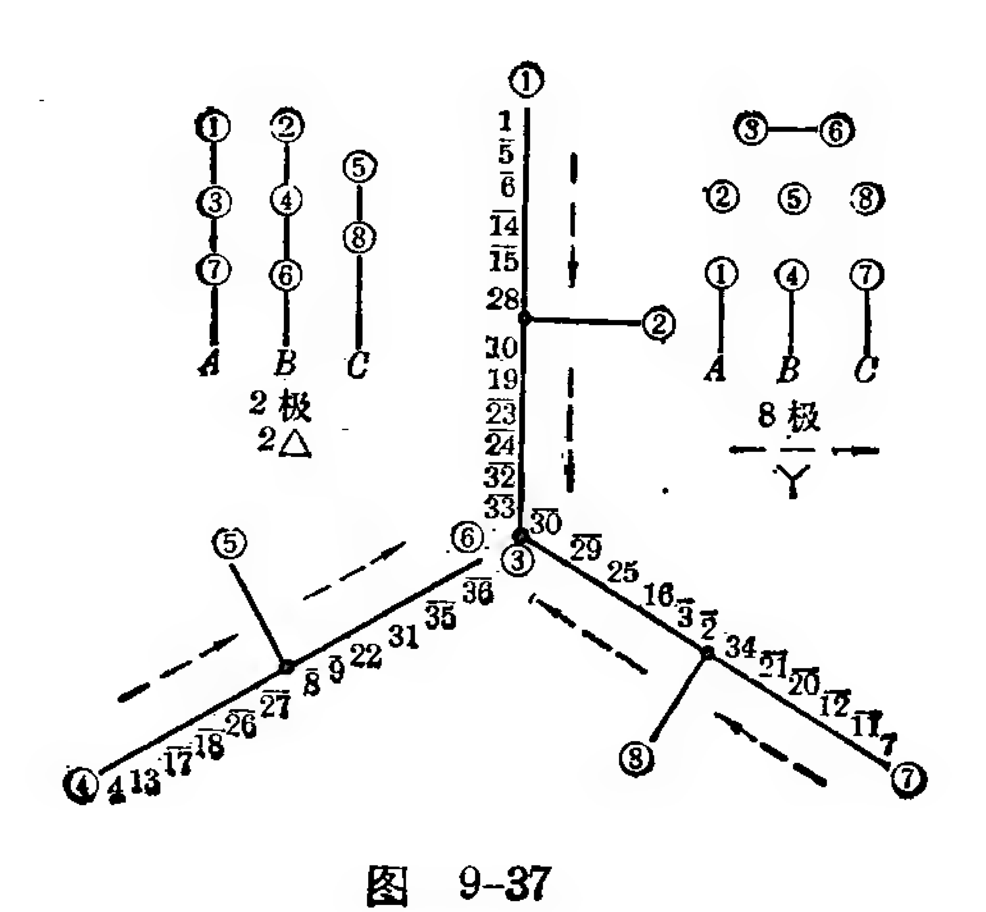


图 9-37

方案8　2/8极(定子36槽)之四

本方案八极为120°相带绕组，反向法得两极。两个极数的转向相同。

绕组系数：(跨距1—16)

两极——$K_d=0.7$　　$K_y=0.966$　$K_{dy}=0.676$

八极——$K_d=0.844$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.731$

联结方式：

同前。

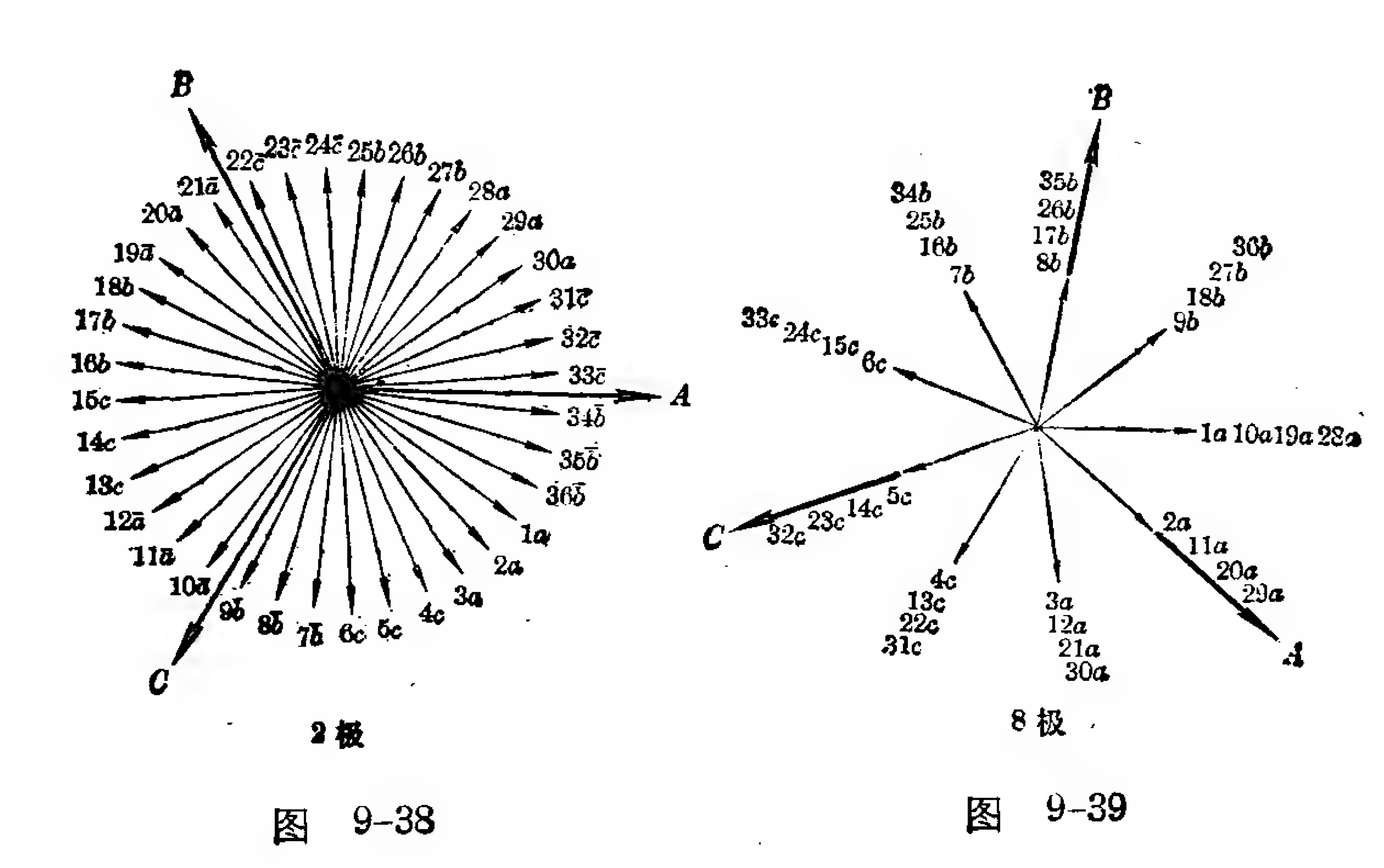


图　9-38

图　9-39

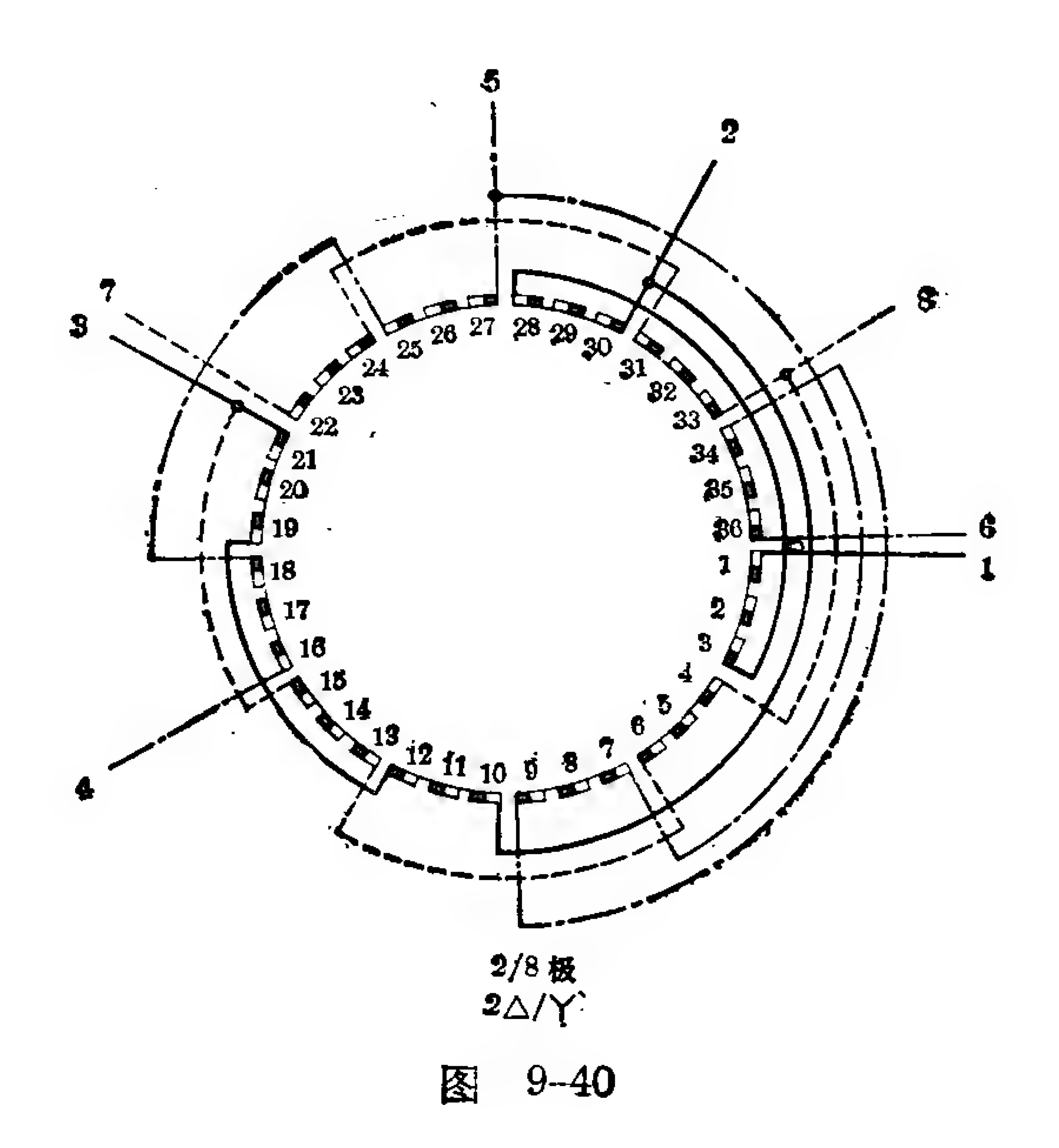


图 9-40

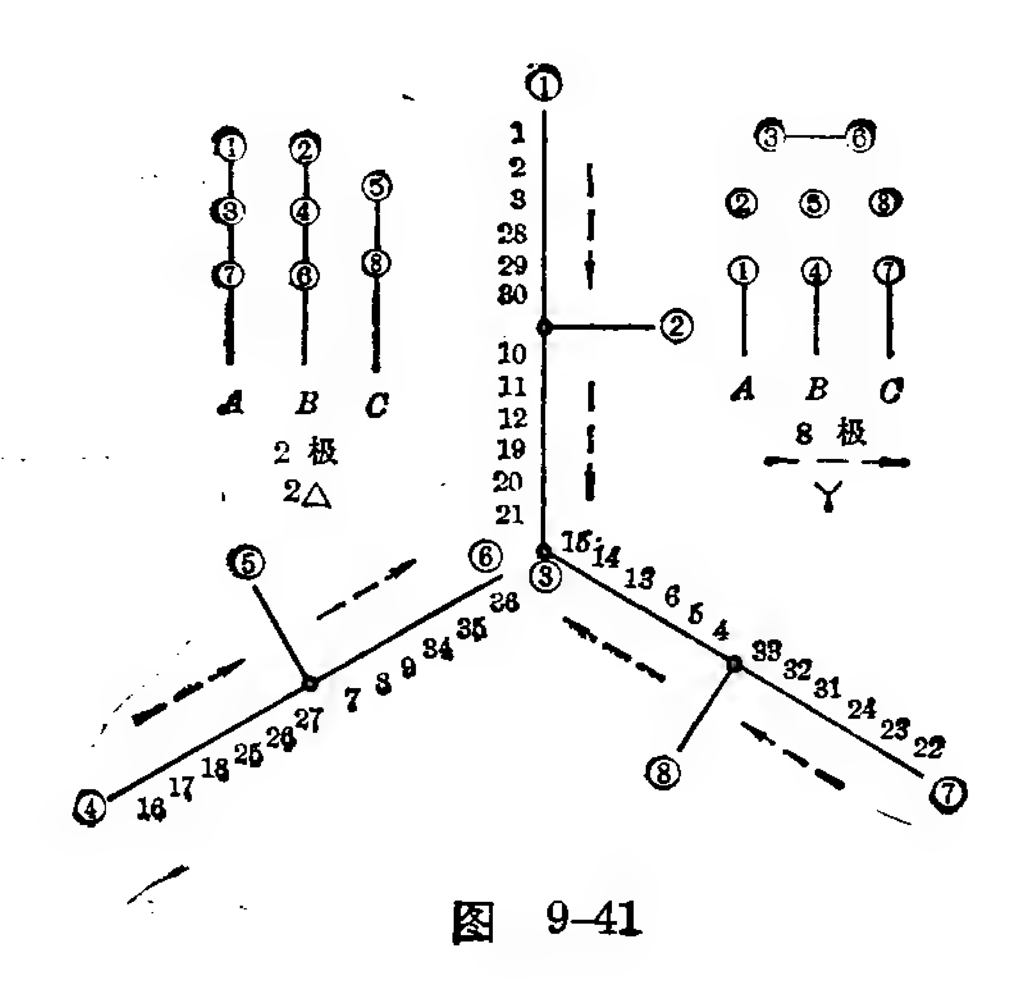


图 9-41

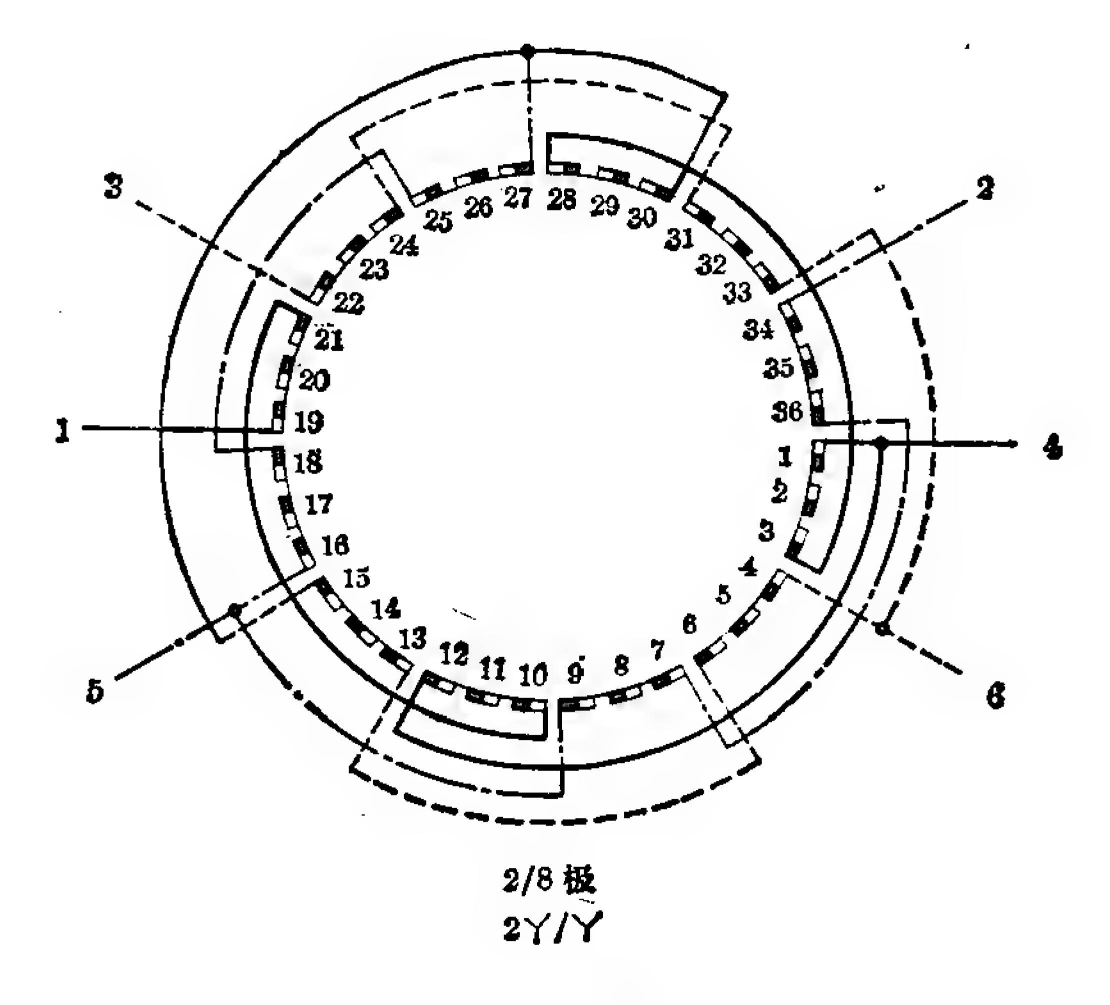


图 9-42

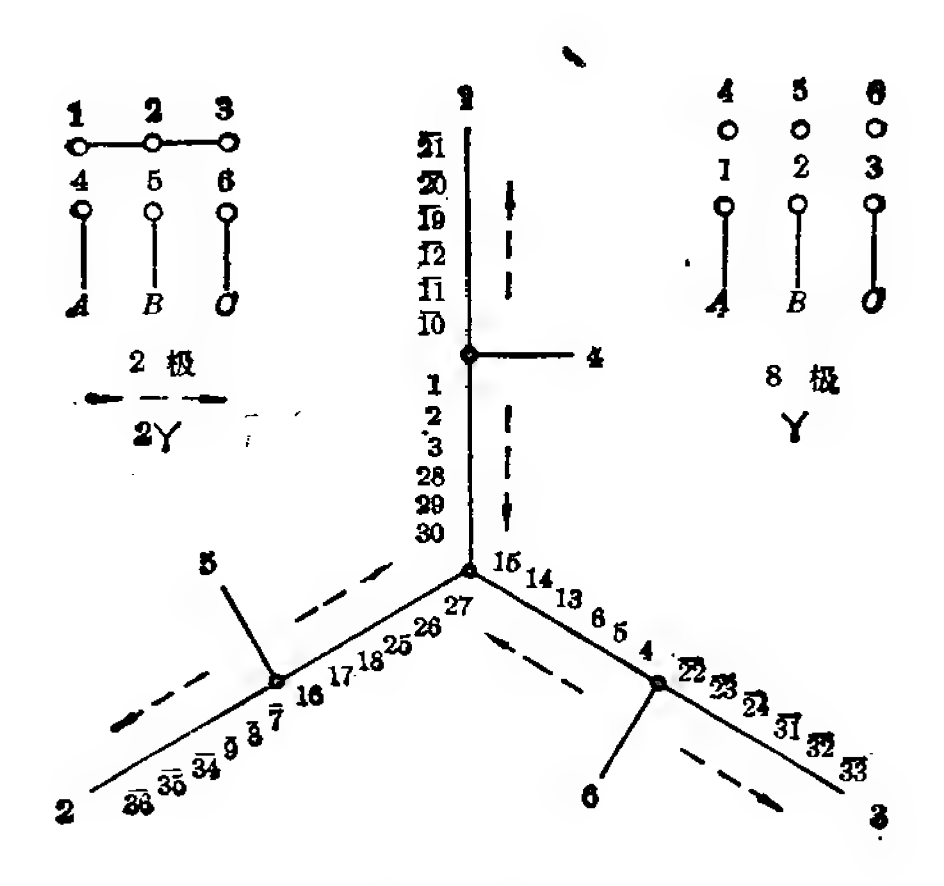


图 9-43

方案9 2/8极(定子36槽)之五

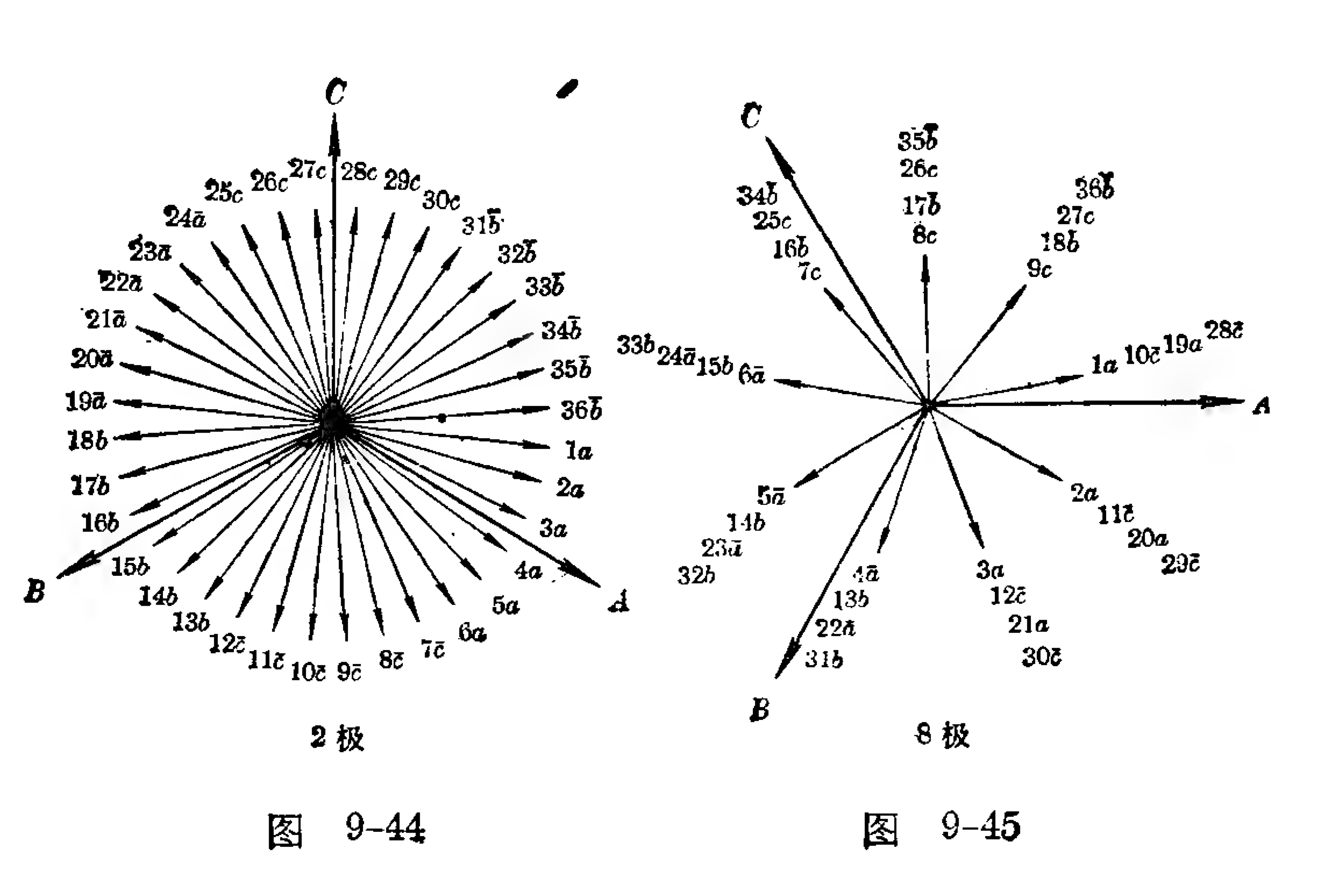
本方案两极为正规60°相带绕组，反向法得八极。两个极数的转向相同，短跨距时两极起动尚好。

绕组系数：

	K_{d2}	K_{y2}	K_{dy2}	K_{d8}	K_{y8}	K_{dy8}
$y=5(1—6)$	0.956	0.423	0.404	0.731	0.985	0.72
$y=14(1—15)$	0.956	0.94	0.90	0.731	0.985	0.72
$y=15(1—16)$	0.956	0.966	0.923	0.731	0.866	0.633

联结方式：

同前。



2 极　　8 极

图 9-44　　图 9-45

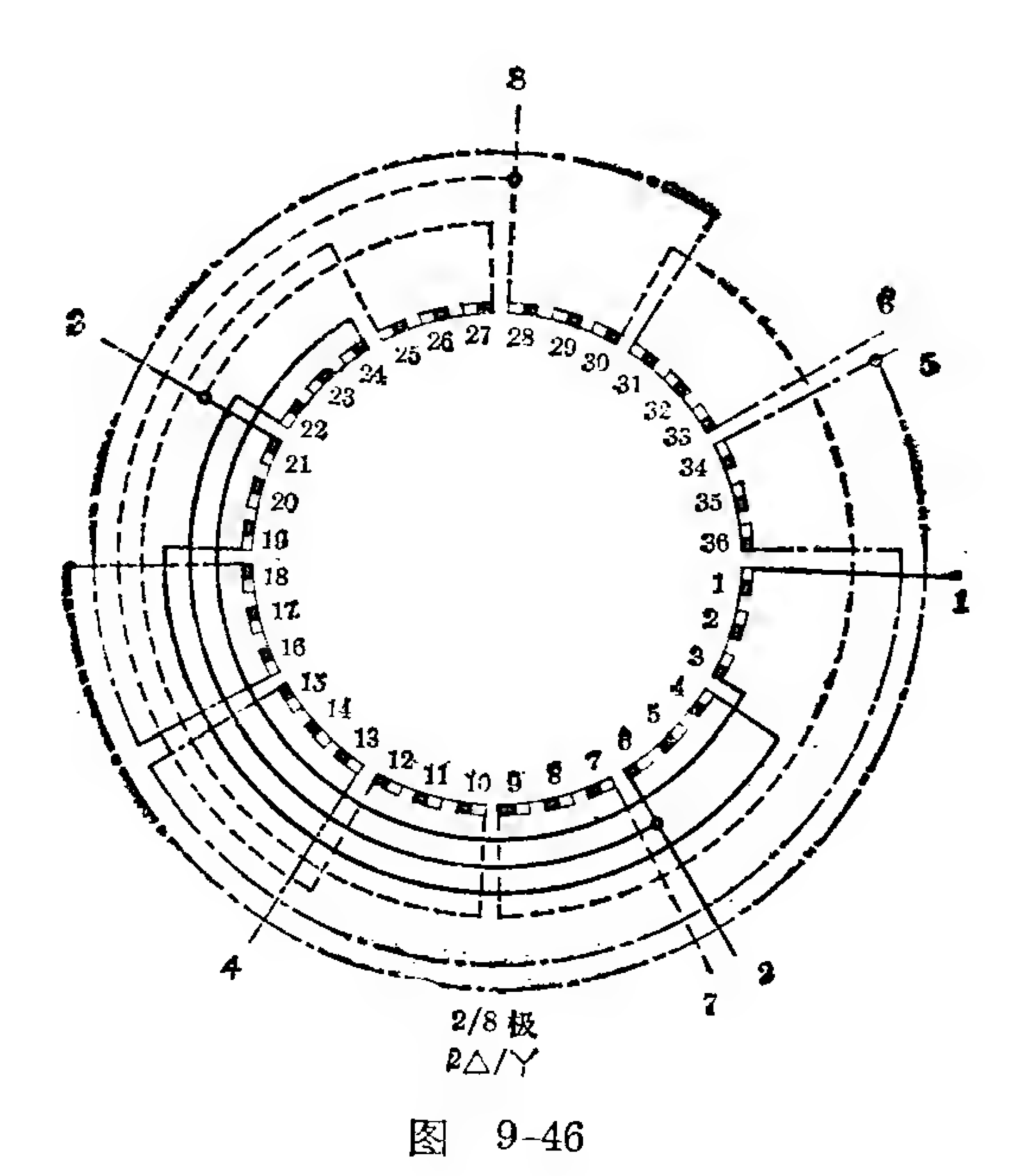


图 9-46

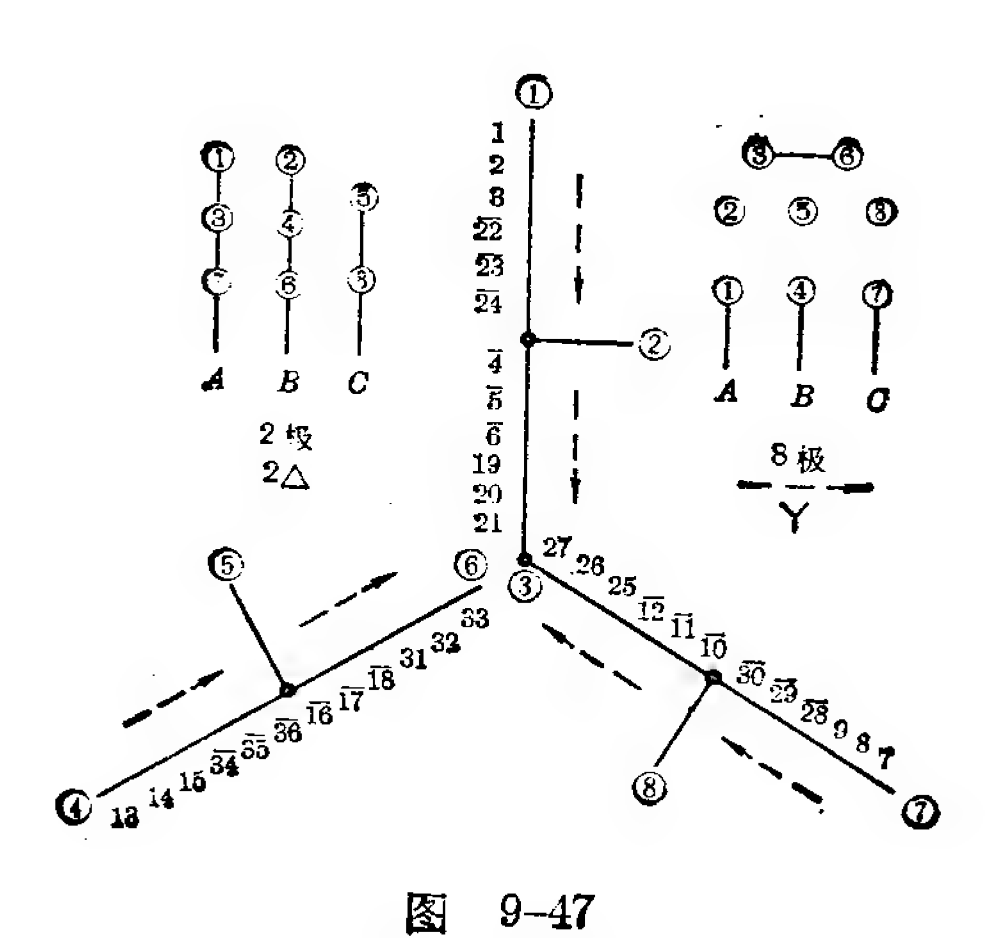


图 9-47

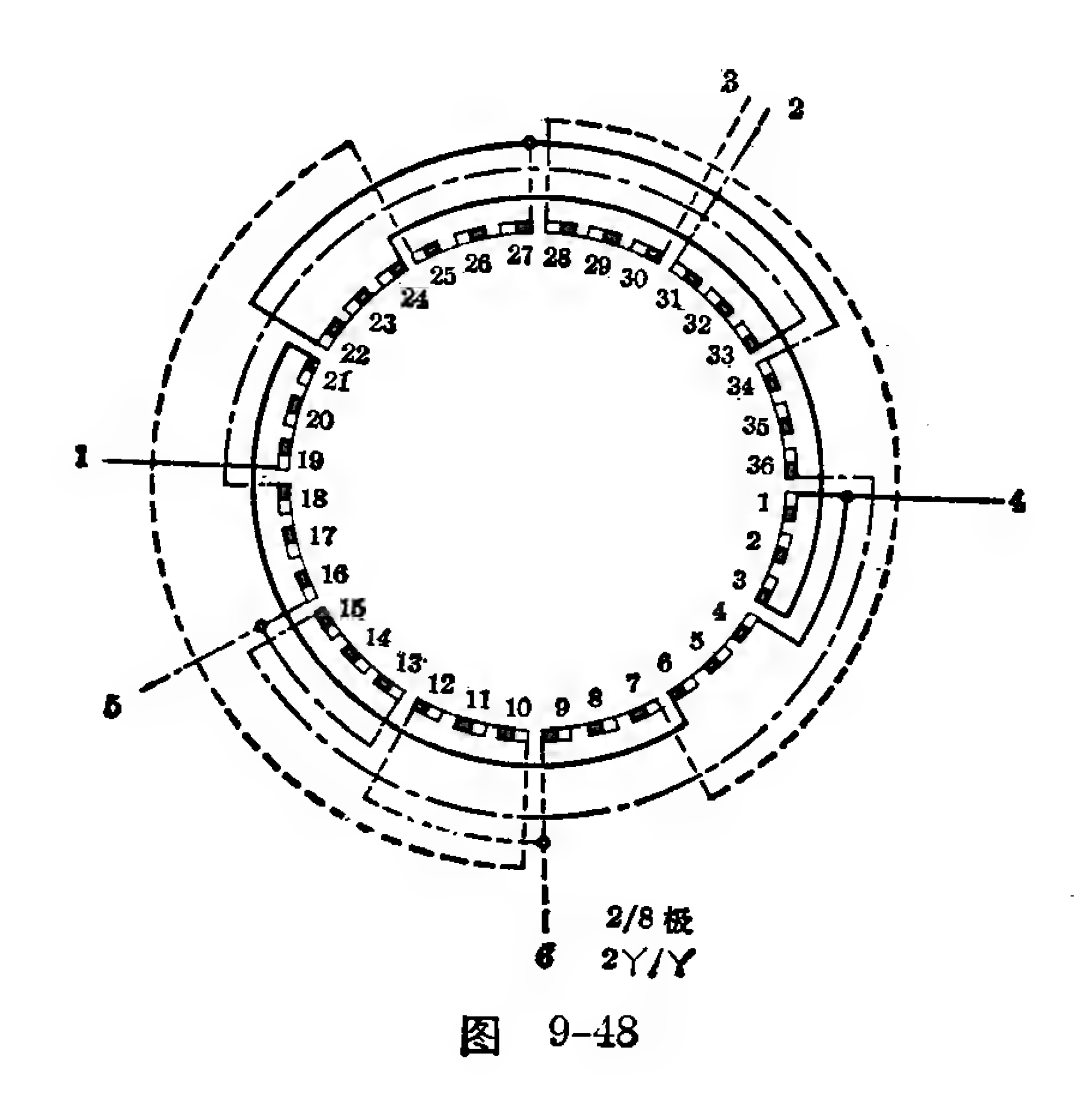


图 9-48

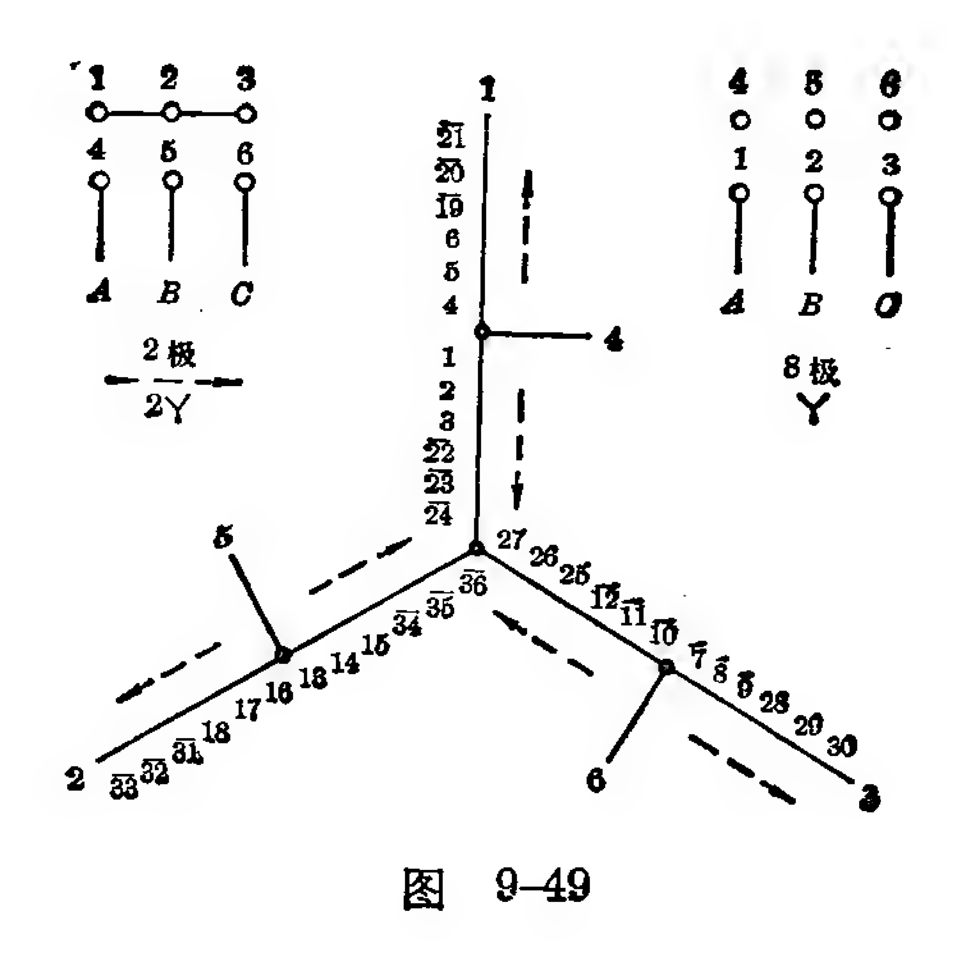


图 9-49

方案10 4/6极(定子36槽)之一

本方案四极为正规60°相带绕组,反向法得六极,两个极数的转向相同。由于六极绕组系数较低,故适用于低速出力要求不高的场合。

绕组系数:

	K_{d4}	K_{y4}	K_{dy4}	K_{d6}	K_{y6}	K_{dy6}
$y=6(1—7)$	0.96	0.866	0.831	0.644	1	0.644
$y=7(1—8)$	0.96	0.94	0.90	0.644	0.966	0.622

联结方式:

2Y/△用于两个极数的功率要求接近的场合。2Y/Y用于要求4极出力较高的场合。引出线6根。

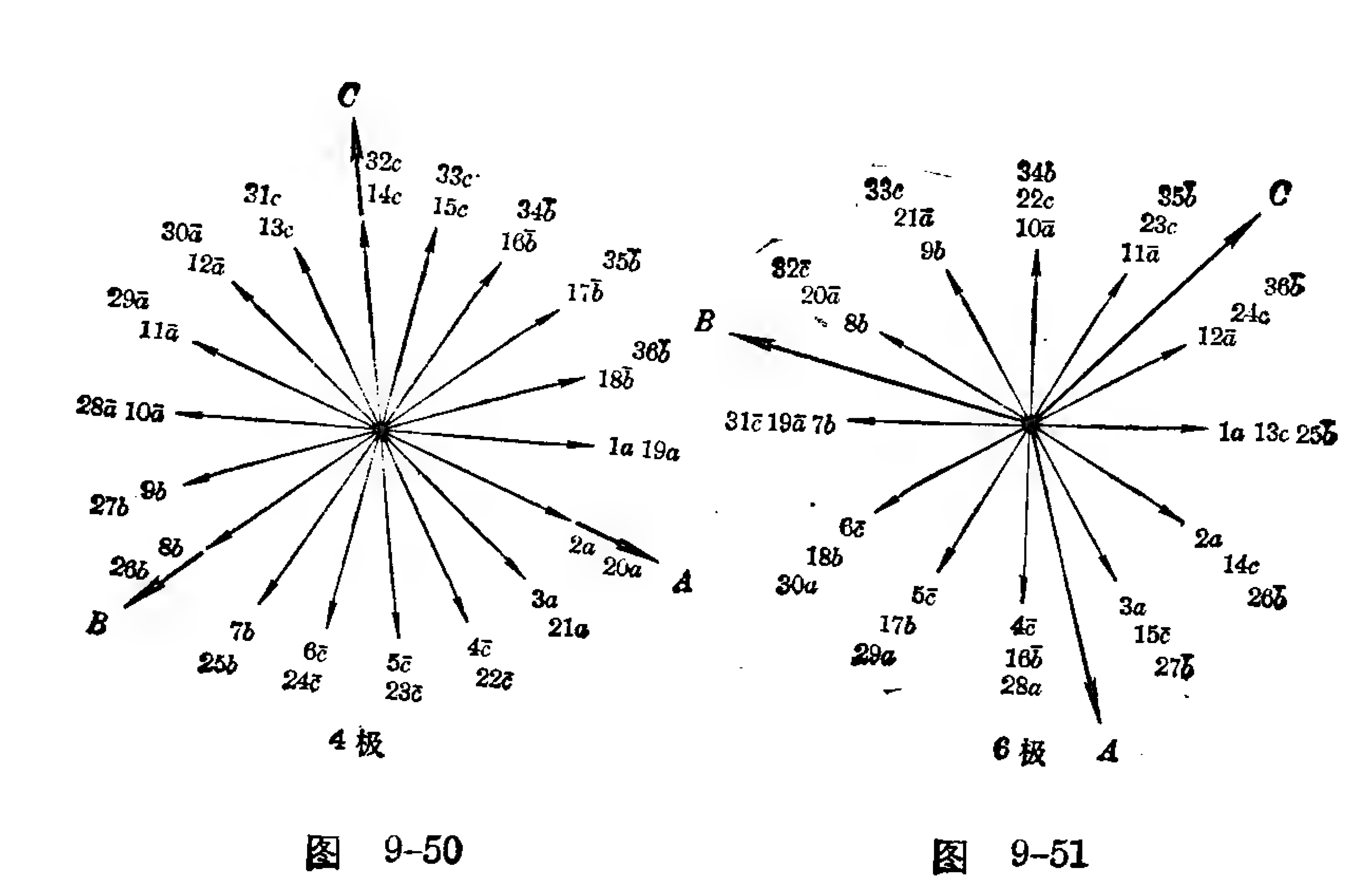


图 9-50　　图 9-51

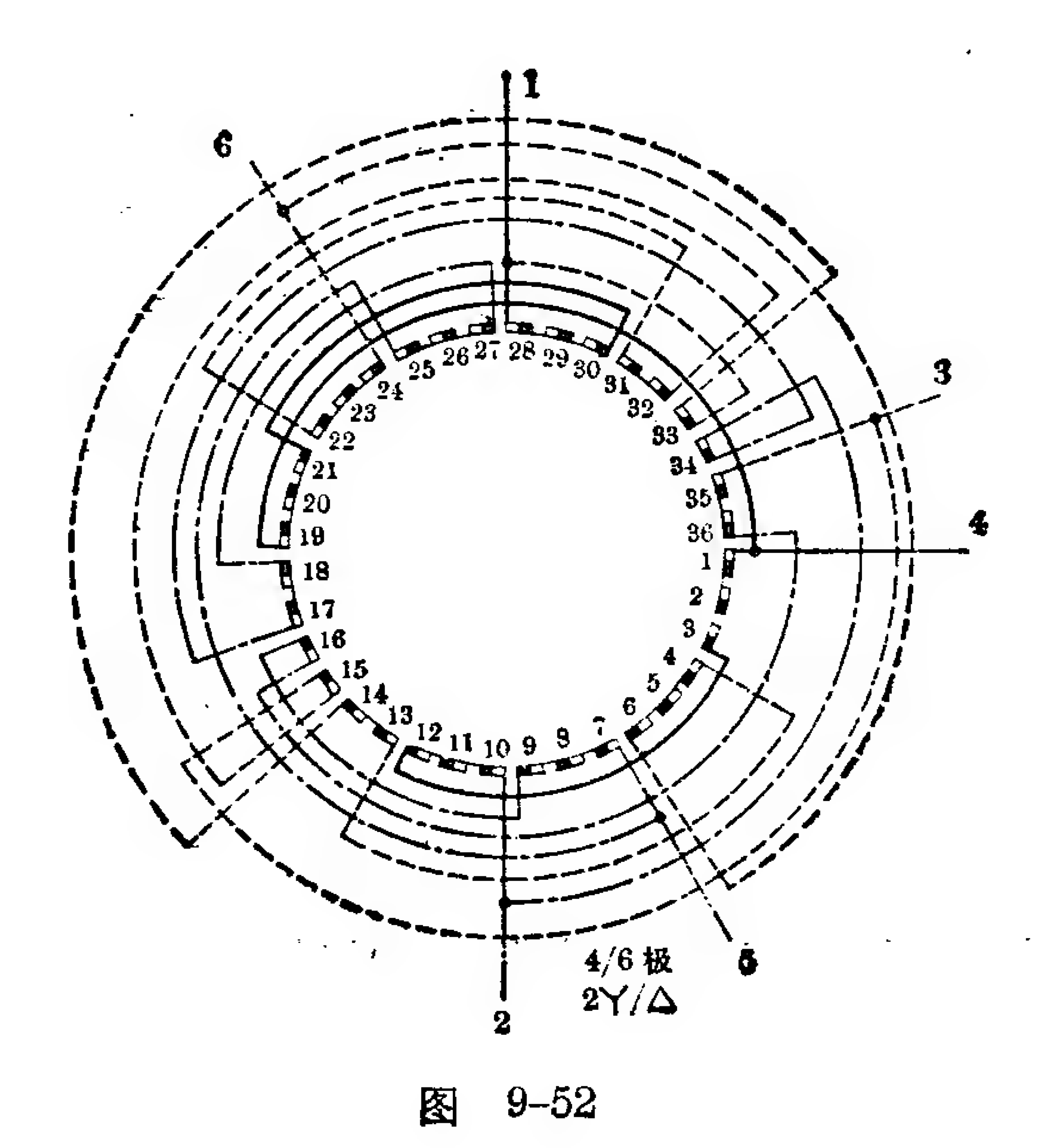


图 9-52

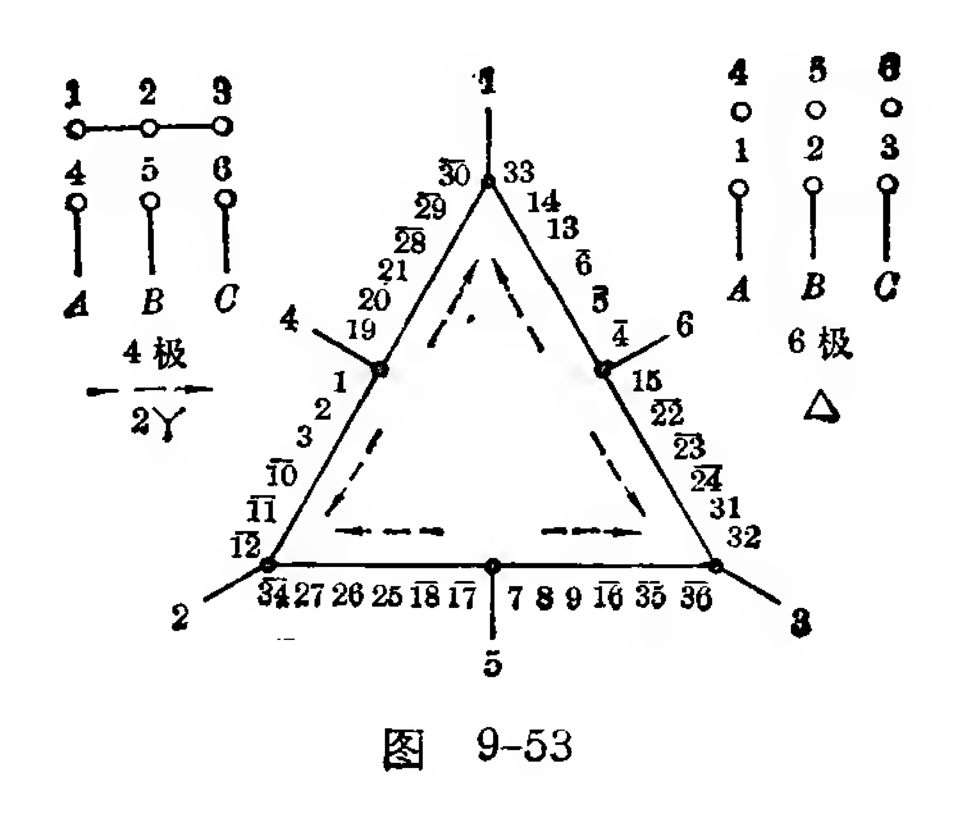


图 9-53

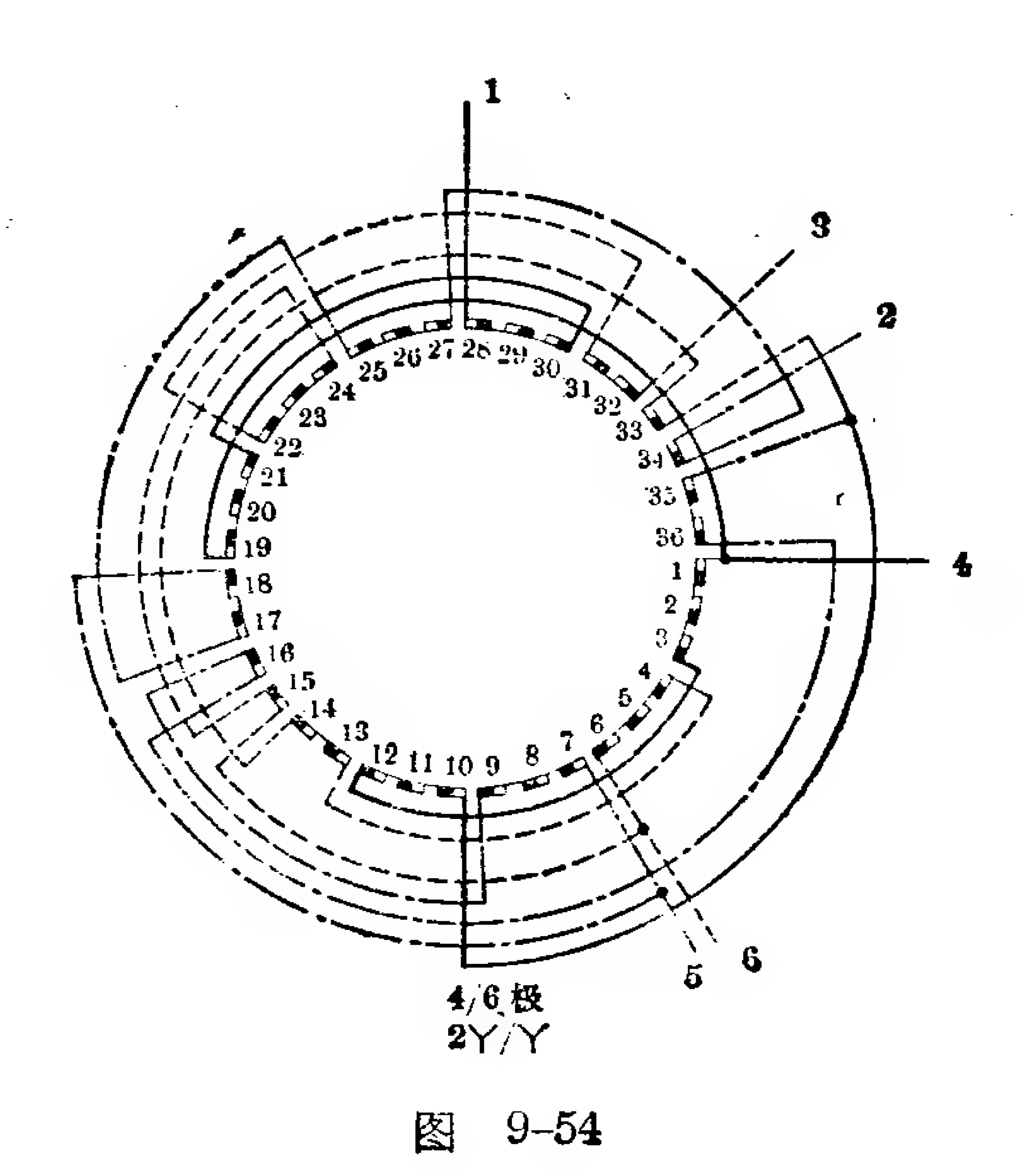


图 9-54

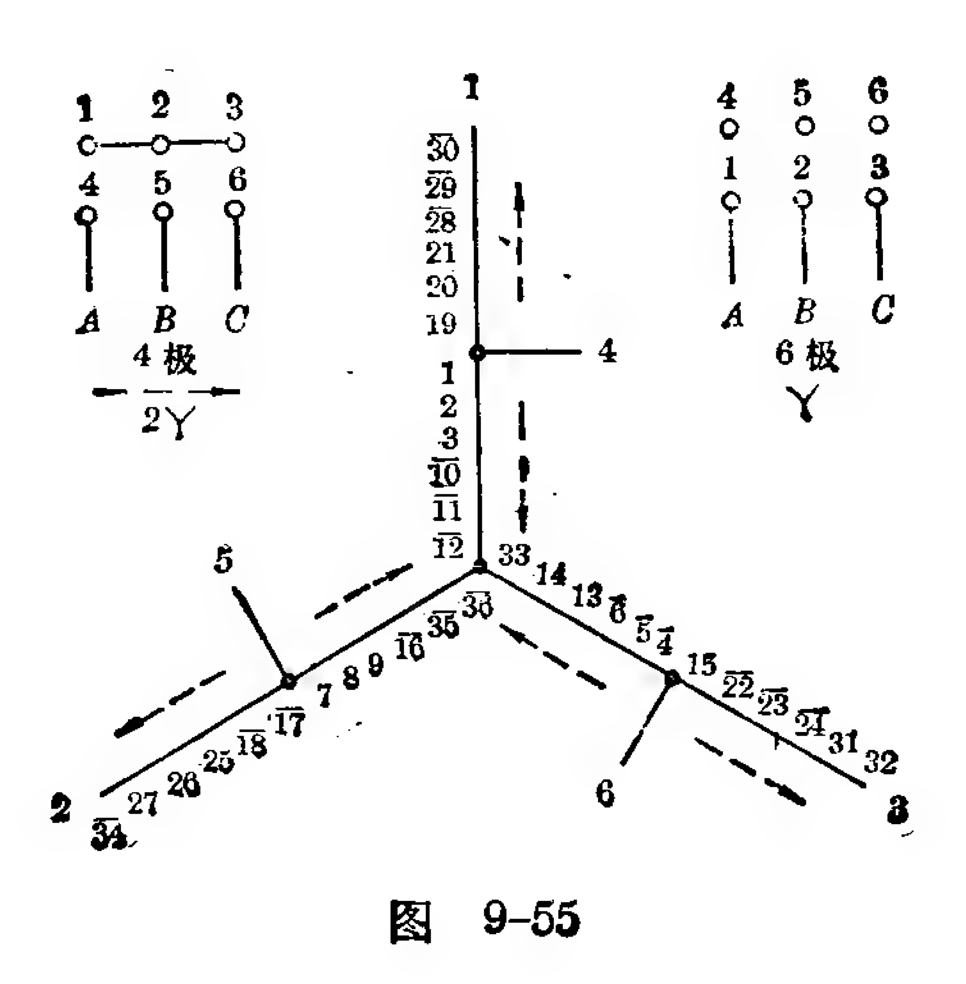


图 9-55

方案 11　4/6 极(定子 36 槽)之二

本方案四极为正规 60° 相带绕组的反转向方案，六极绕组系数较低，适用于低速出力要求不高的场合。

绕组系数：

同方案 10。

联结方式：

同方案 10。

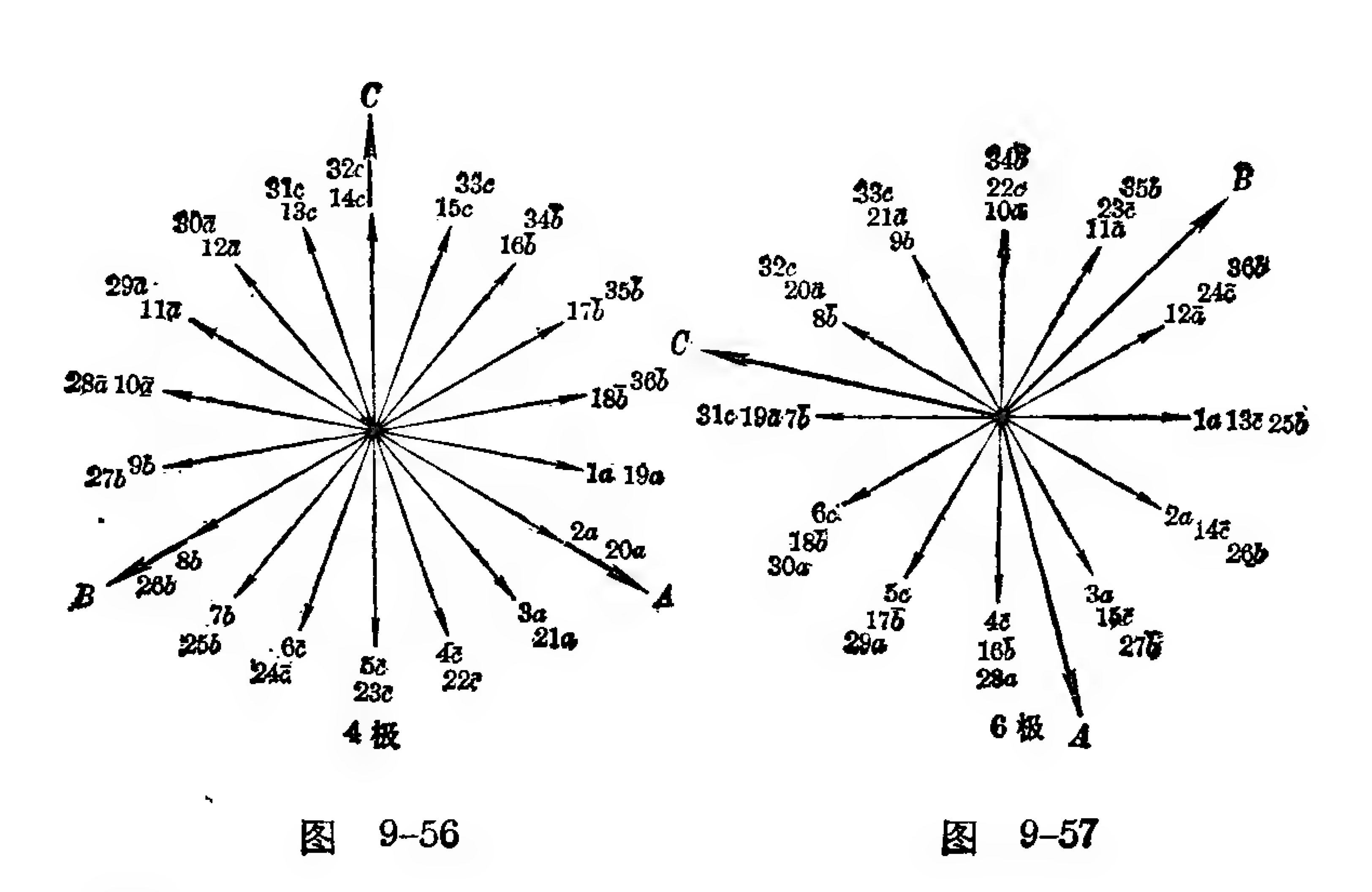


图　9-56　　　　图　9-57

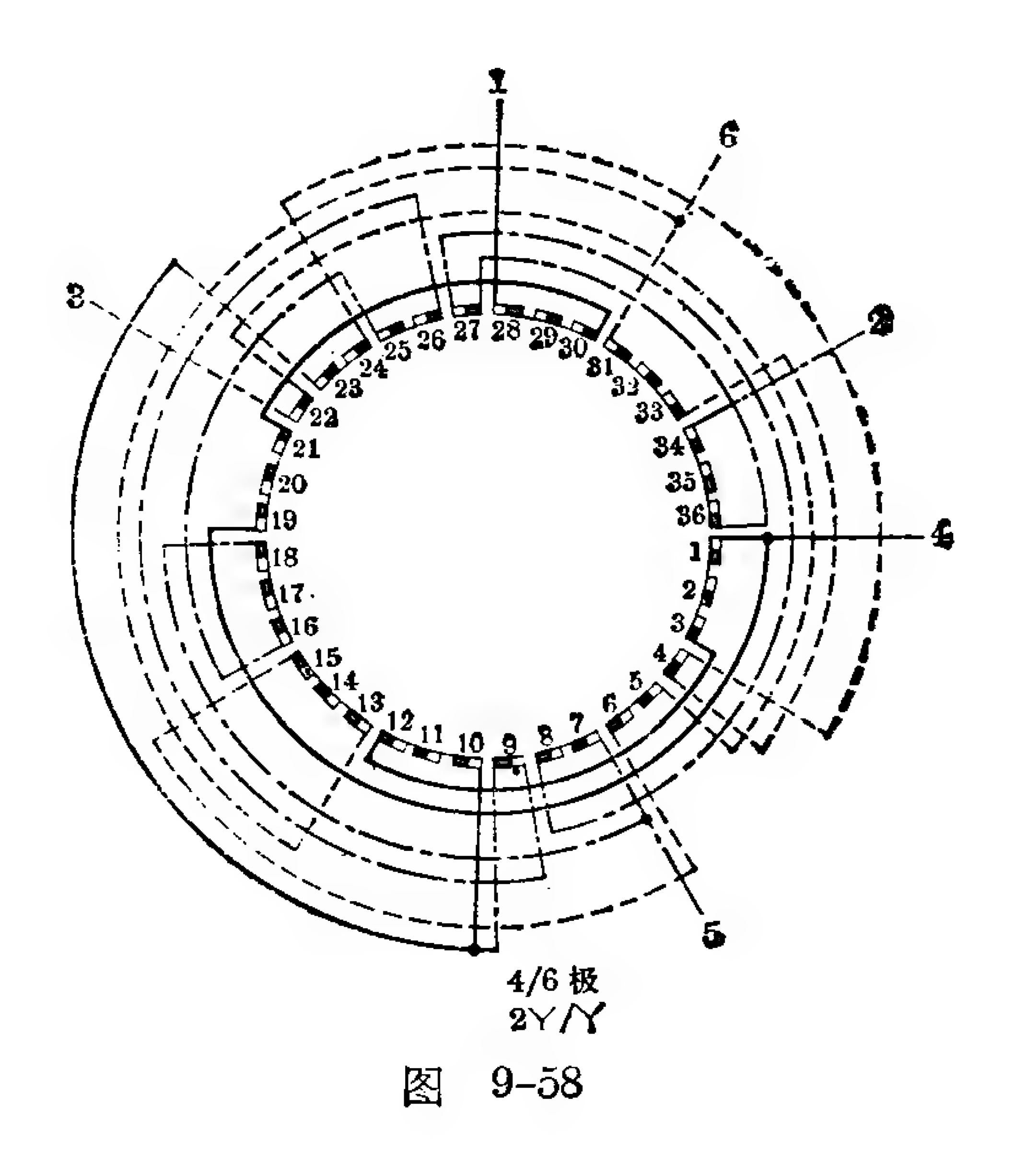


图 9-58

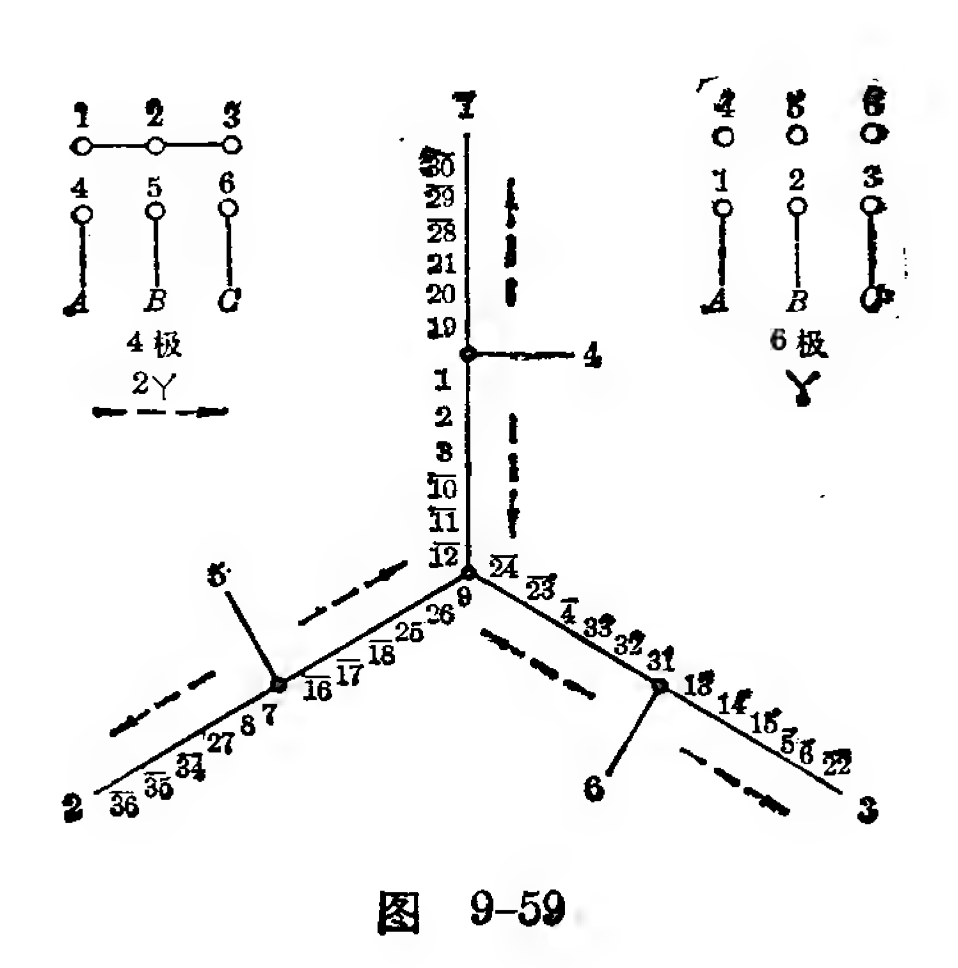
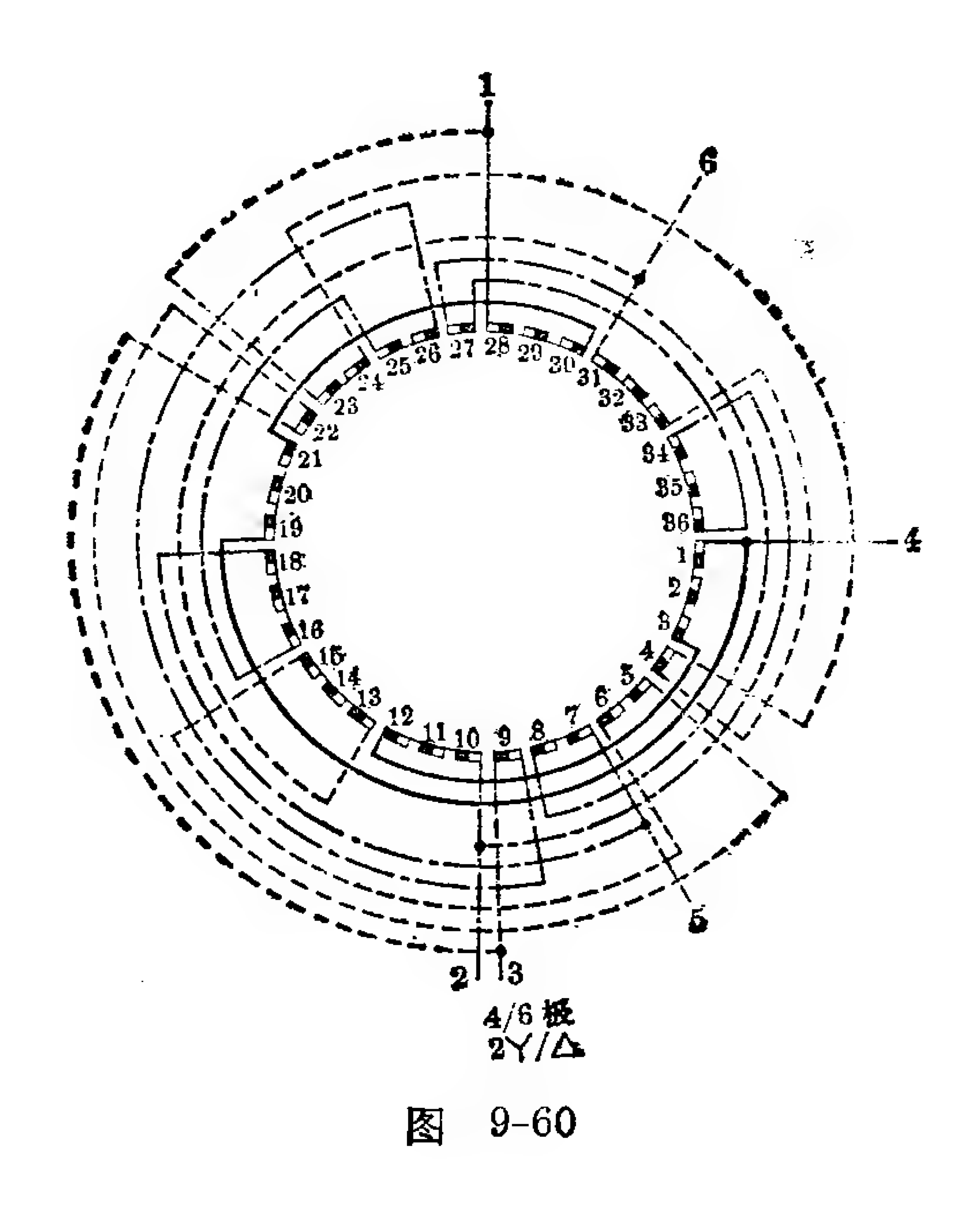
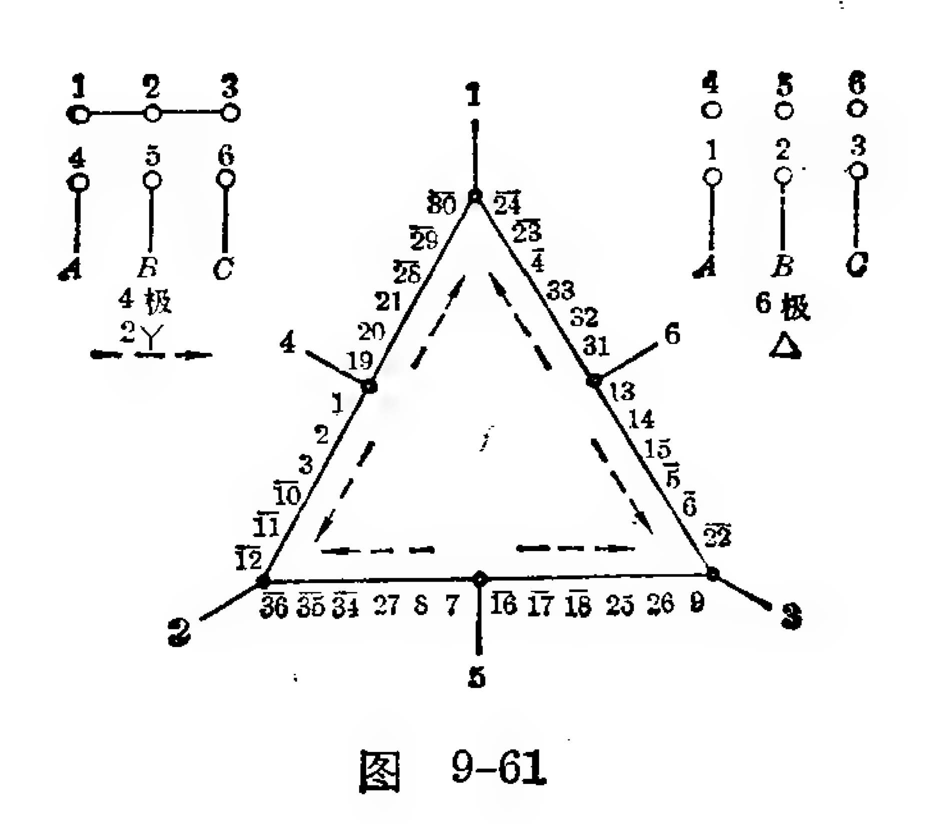


图 9-59



1
6
4
5
2
3
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36
4/6 极
2Y/△

图 9-60



1 2 3
4 5 6
A B C
4 极
2Y
1
4
6
2
5
3
$\overline{30}$ $\overline{29}$ $\overline{28}$ 21 20 19
$\overline{24}$ $\overline{23}$ $\overline{4}$ 33 32 31
1 2 3 $\overline{10}$ $\overline{11}$ $\overline{12}$
13 14 15 $\overline{5}$ $\overline{6}$ $\overline{22}$
$\overline{36}$ $\overline{35}$ $\overline{34}$ 27 8 7
$\overline{16}$ $\overline{17}$ $\overline{18}$ 25 26 9
4 5 6
1 2 3
A B C
6 极
△

图 9-61

方案 12　4/6 极（定子 36 槽）之三

本方案为不规则分布的同转向方案。

绕组系数：（跨距 1—10）

四极——$K_d=0.831$　$K_y=1$　　　$K_{dy}=0.831$

六极——$K_d=0.88$　$K_y=0.707$　$K_{dy}=0.622$

联结方式：

同方案 10。

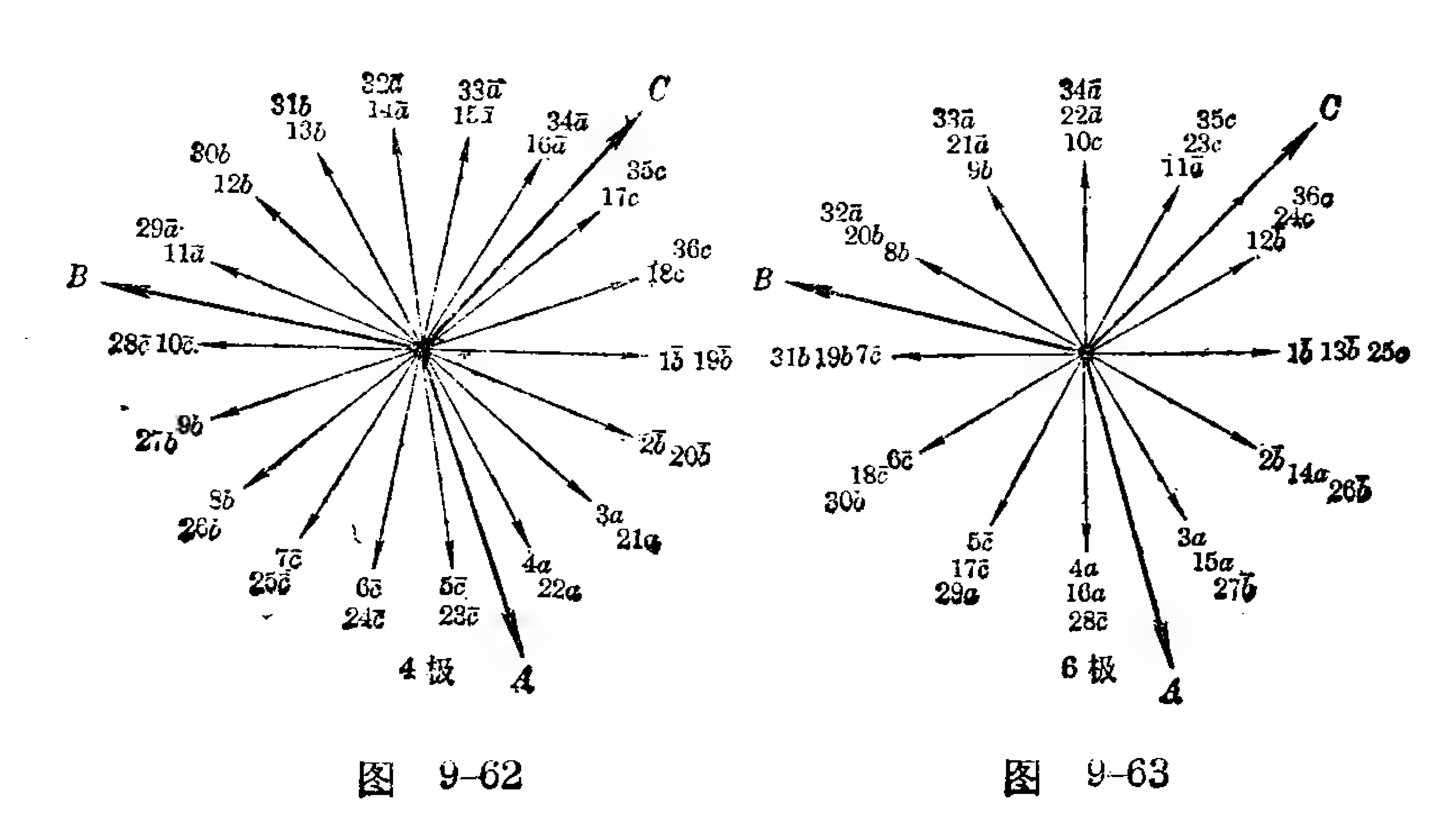


图　9-62　　　　图　9-63

4/6 极
2Y/△

图 9-64

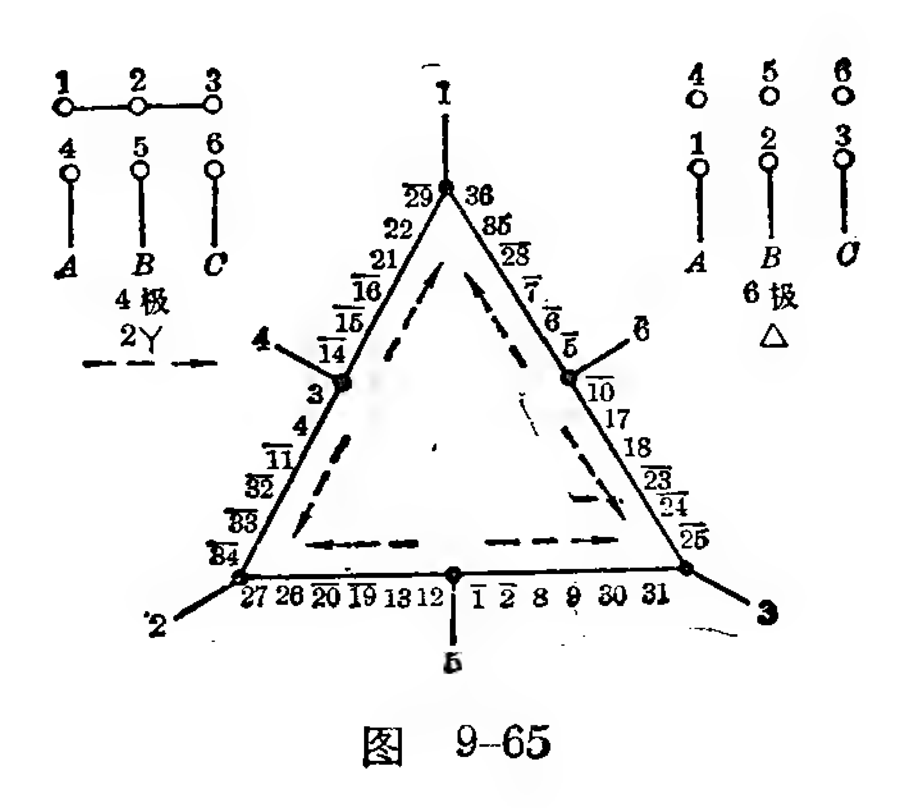


图 9-65

4/6 极
2Y/Y

图 9-66

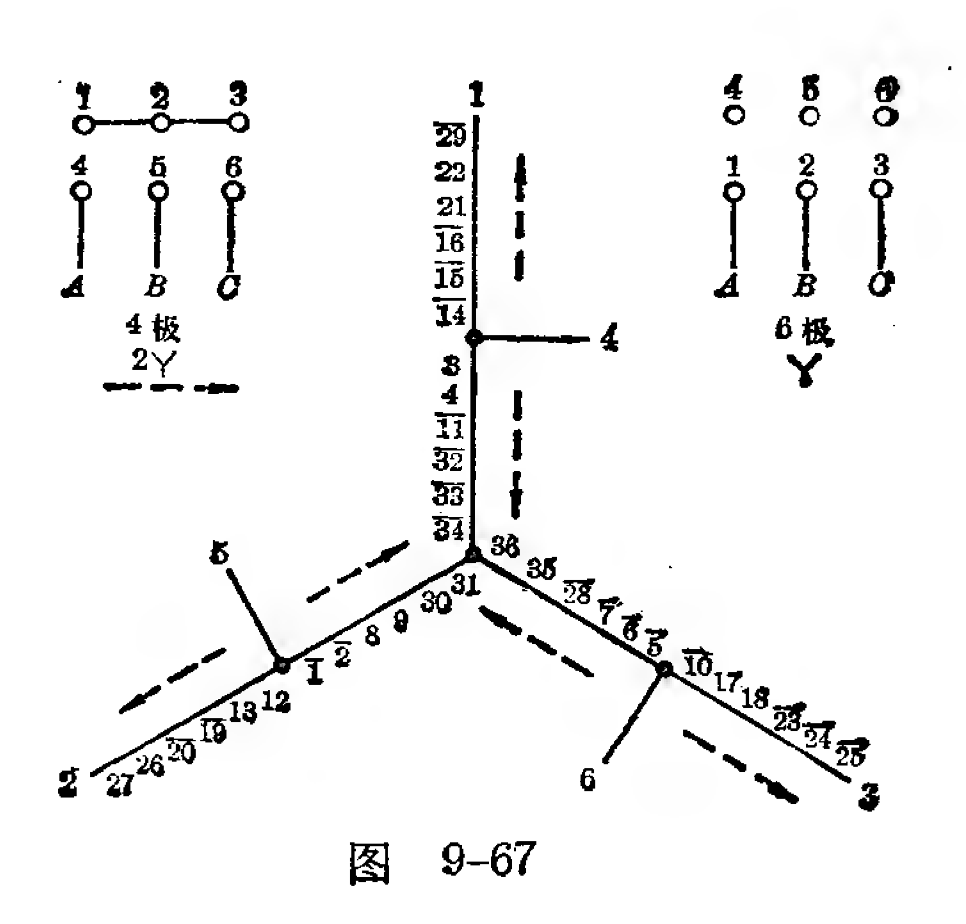


图 9-67

方案 13　4/6 极(定子 36 槽)之四

本方案为不规则分布的反转向方案。两个极数的绕组系数较接近，也较高，故适用于两个极数的功率要求均较高的场合。附录一中单绕组 4/6 极双速电动机均采用此方案。

绕组系数：(跨距 1—7)

四极——$K_d=0.83$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.72$

六极——$K_d=0.88$　$K_y=1$　　$K_{dy}=0.88$

联结方式：

2Y/△，引出线 6 根。

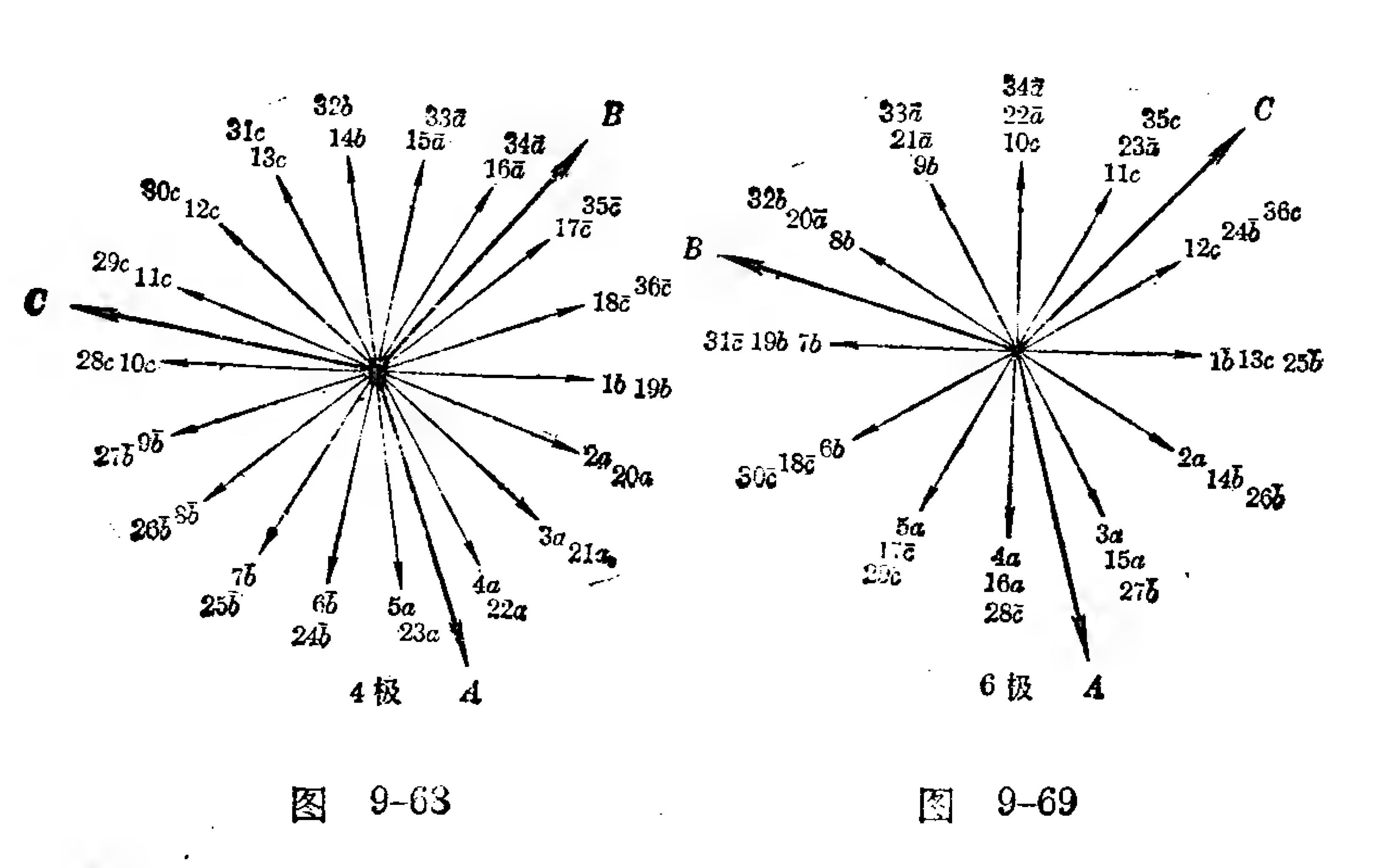


图　9-68　　　　图　9-69

4/6 极
2Y/△

图 9-70

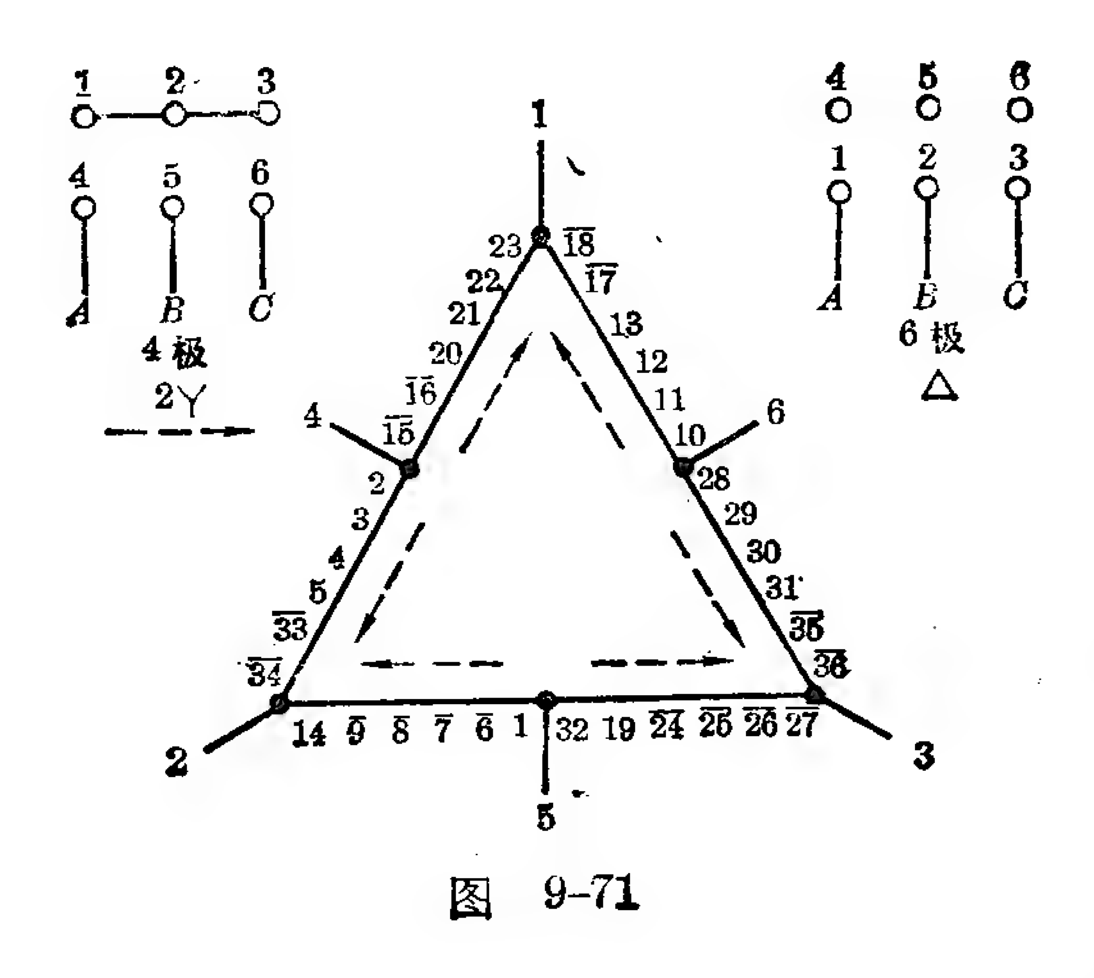


图 9-71

方案 14　4/6 极(定子 48 槽)

本方案四极为正规 60° 相带绕组，部分线圈分裂成两部分是为了使六极绕组三相接近对称。两个极数的转向相同。

绕组系数：(跨距 1—9)

四极——$K_d=0.957$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.83$

六极——$K_d=0.628$　$K_y=1$　$K_{dy}=0.628$

联结方式：

2Y/Y，引出线 6 根。

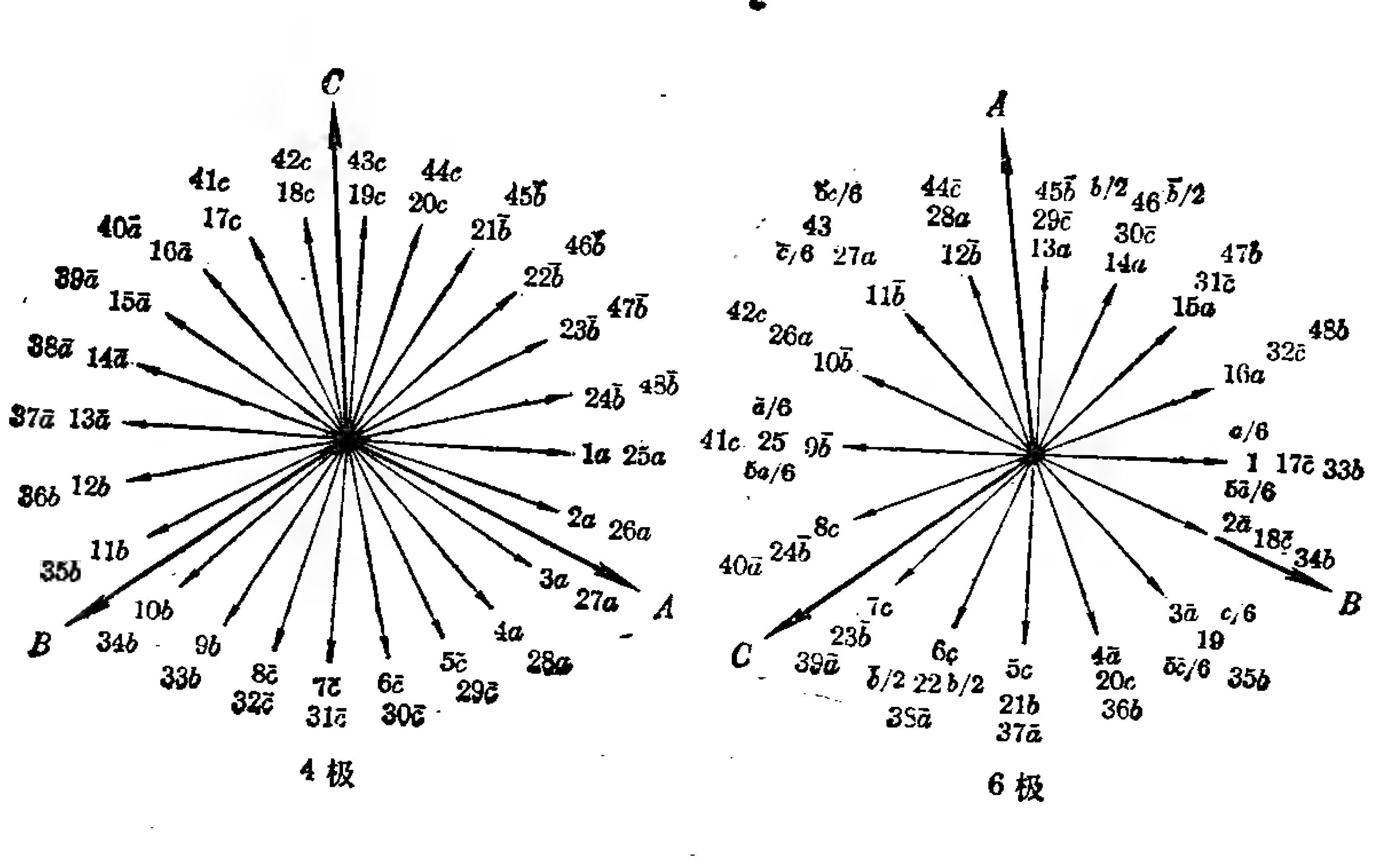


图　9-72　　　　图　9-73

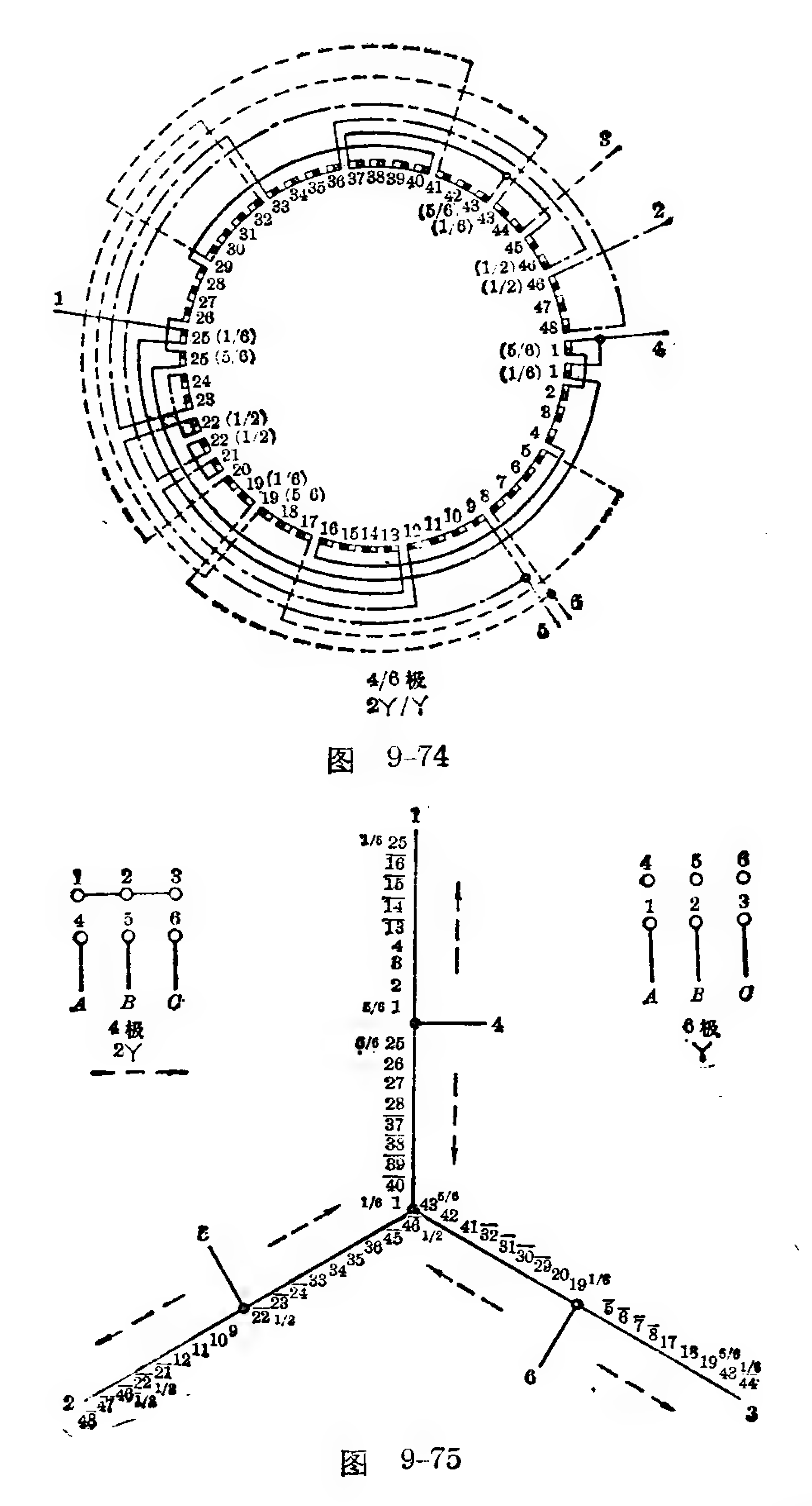


图 9-74

图 9-75

方案 15　6/8 极(定子 36 槽)之一

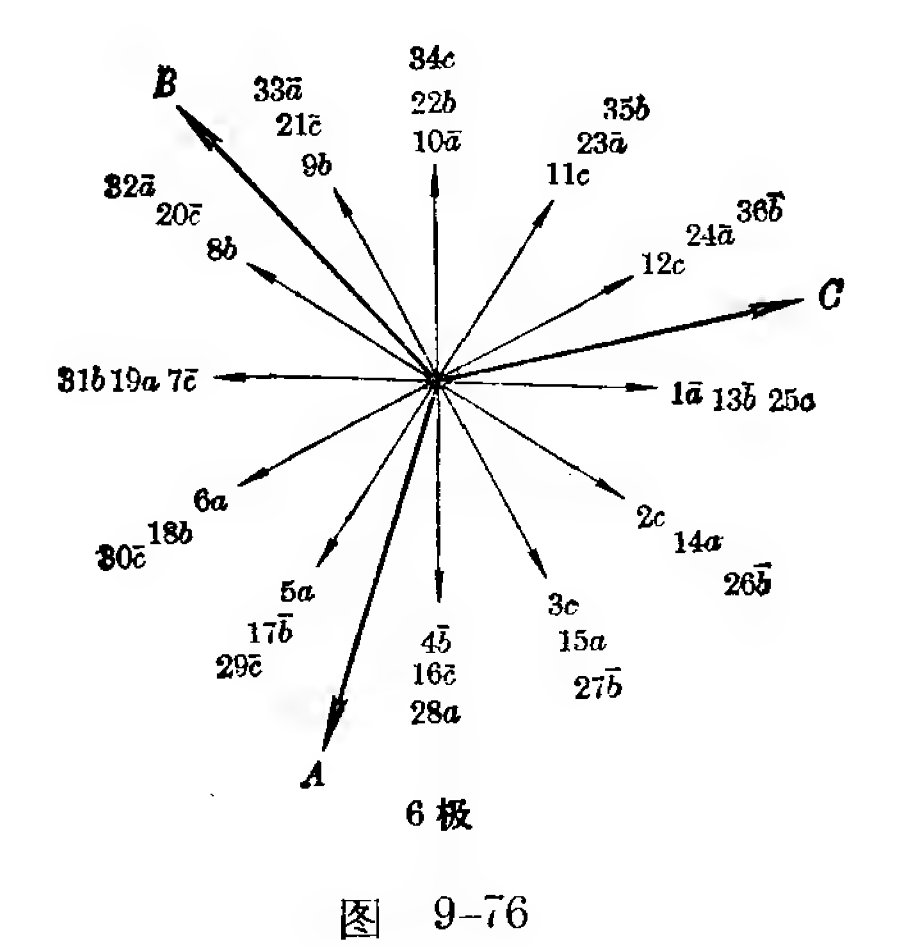
本方案八极为正规分数槽绕组，反向得六极。两个极数的转向相同。

绕组系数：

	K_{d6}	K_{y6}	K_{dy6}	K_{d8}	K_{y8}	K_{dy8}
$y=5(1-6)$	0.644	0.966	0.622	0.96	0.985	0.945
$y=6(1-7)$	0.644	1	0.644	0.96	0.866	0.83

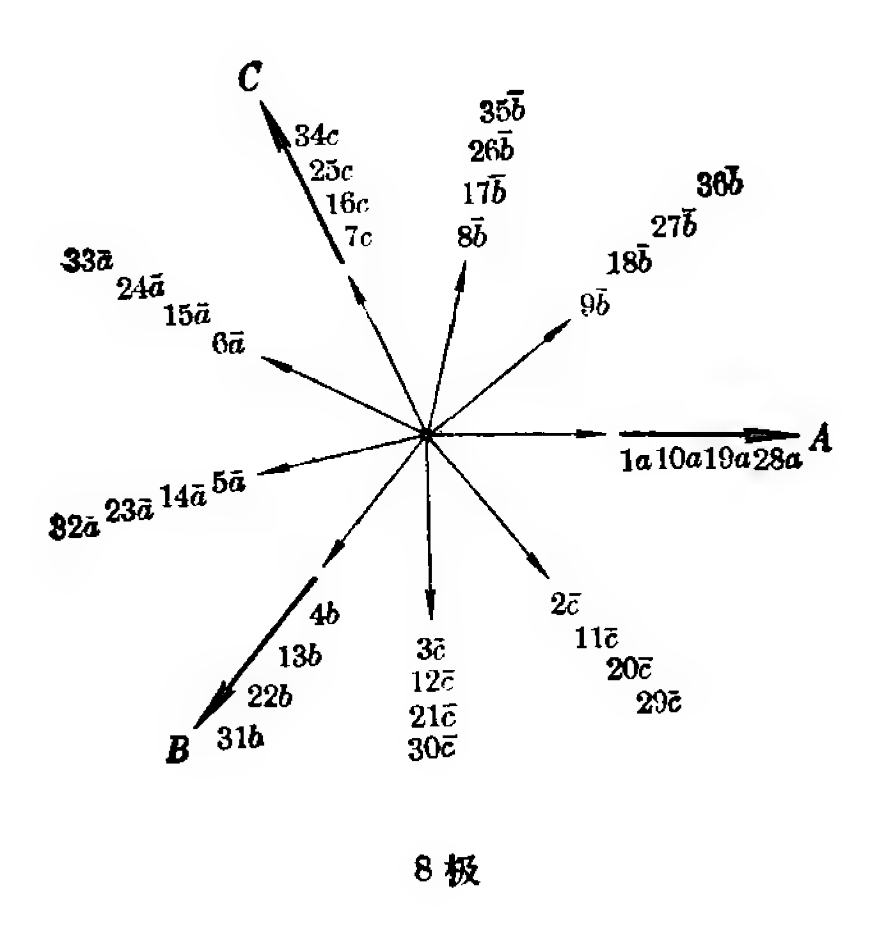
联结方式：

2Y/△ 或 2Y/Y，引出线 6 根。



B
$33\bar{a}$ $21\bar{c}$ $9b$
$34c$ $22b$ $10\bar{a}$
$35\bar{b}$ $23\bar{a}$ $11c$
$36\bar{b}$ $24\bar{a}$ $12c$
C
$1\bar{a}$ $13\bar{b}$ $25a$
$2c$ $14a$ $26\bar{b}$
$3c$ $15a$ $27\bar{b}$
$4\bar{b}$ $16\bar{c}$ $28a$
$5a$ $17\bar{b}$ $29\bar{c}$
A
$6a$ $18b$ $30\bar{c}$
$31b$ $19a$ $7\bar{c}$
$32\bar{a}$ $20\bar{c}$ $8b$
6 极

图 9-76



C
$34c$ $25c$ $16c$ $7c$
$35\bar{b}$ $26\bar{b}$ $17\bar{b}$ $8\bar{b}$
$36\bar{b}$ $27\bar{b}$ $18\bar{b}$ $9\bar{b}$
A
$1a$ $10a$ $19a$ $28a$
$2\bar{c}$ $11\bar{c}$ $20\bar{c}$ $29\bar{c}$
$3\bar{c}$ $12\bar{c}$ $21\bar{c}$ $30\bar{c}$
B
$4b$ $13b$ $22b$ $31b$
$5\bar{a}$ $14\bar{a}$ $23\bar{a}$ $32\bar{a}$
$6\bar{a}$ $15\bar{a}$ $24\bar{a}$ $33\bar{a}$
8 极

图 9-77

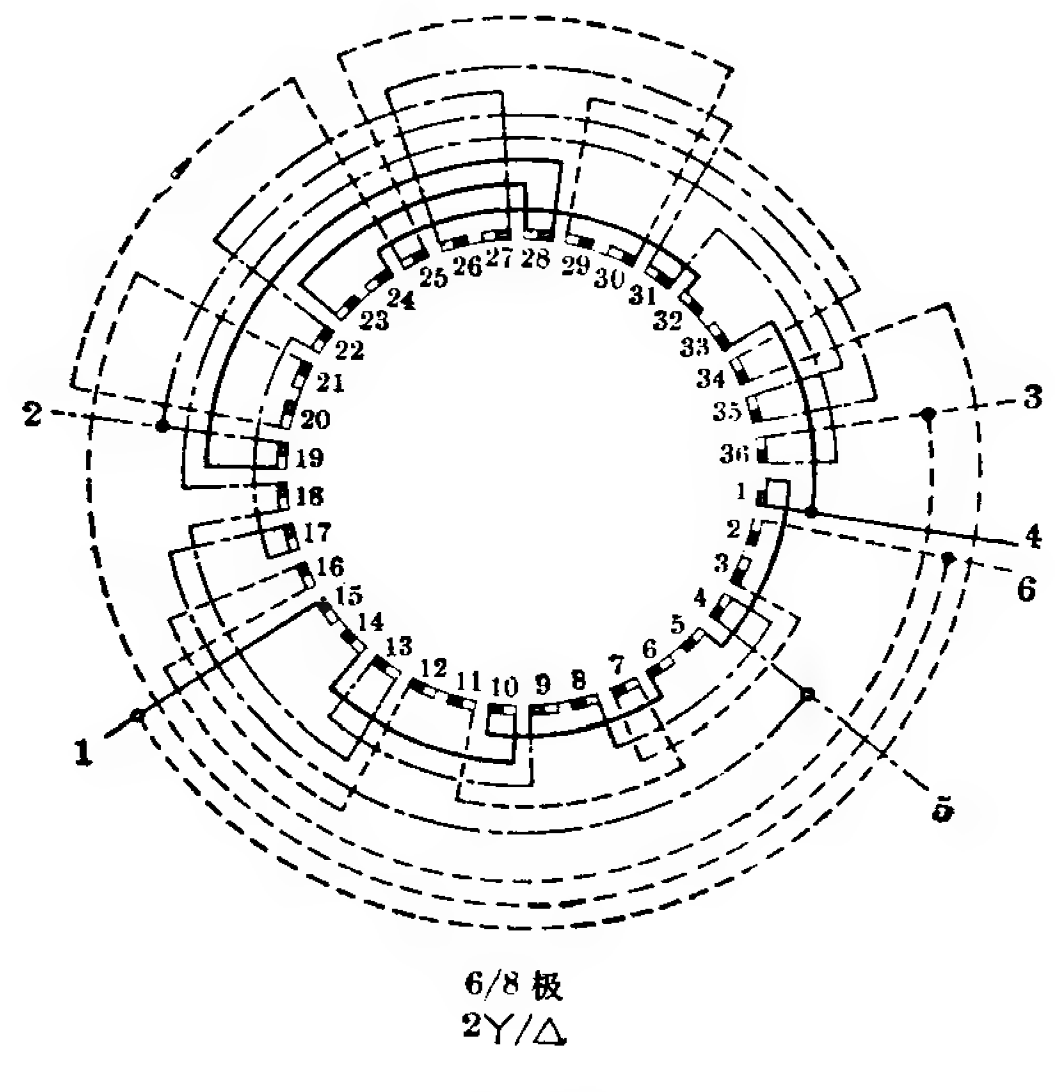


图 9-78

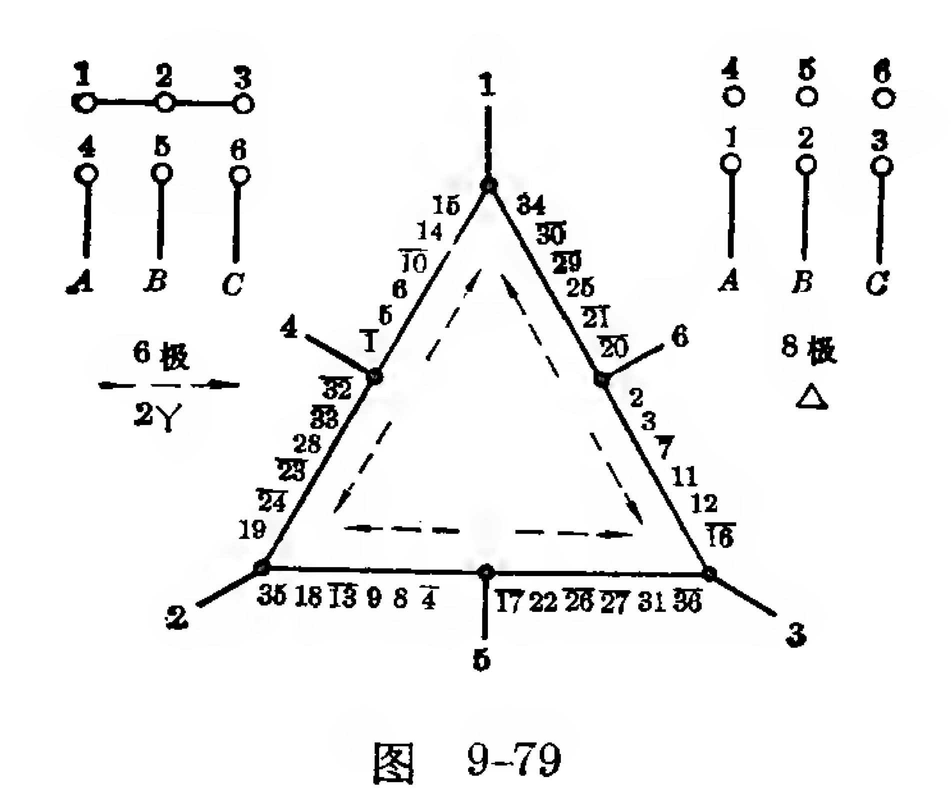


图 9-79

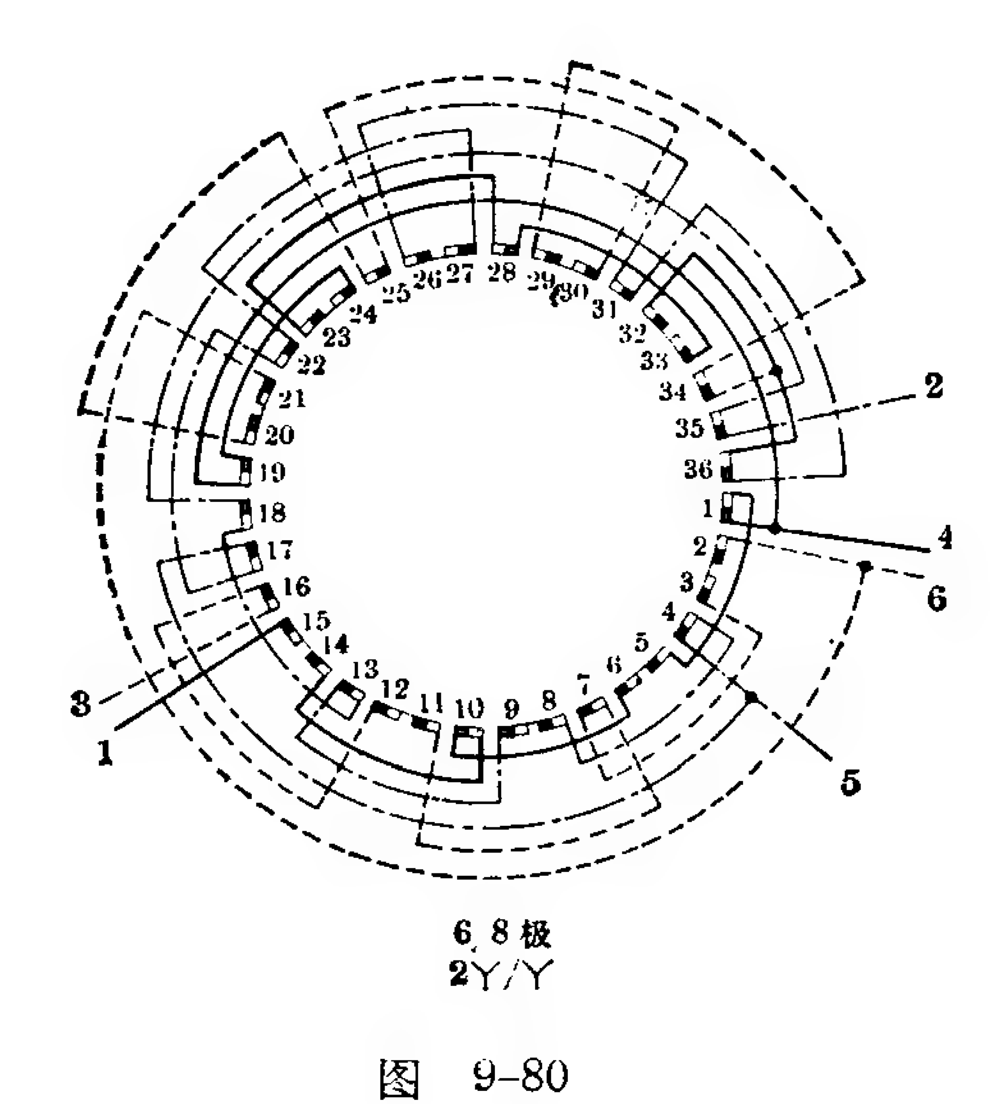


图 9-80

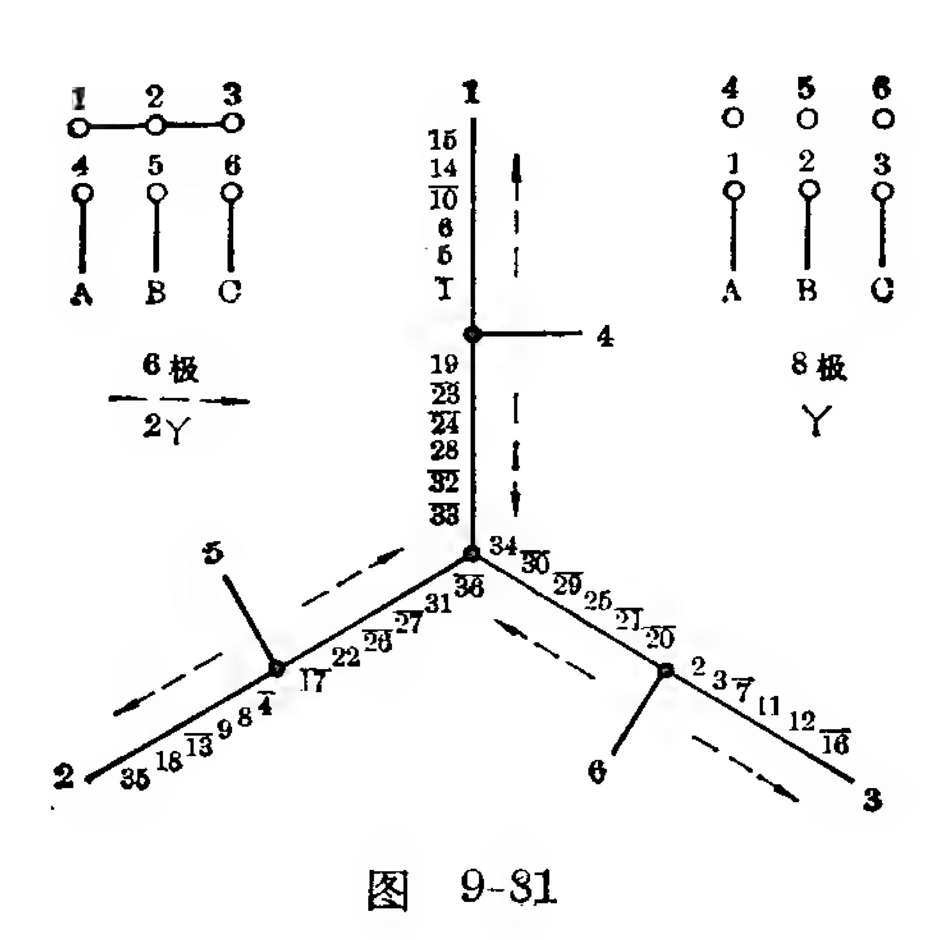


图 9-81

方案16　6/8极（定子36槽）之二

本方案八极为正规分数槽绕组，反向得六极。两个极数的转向相反。

绕组系数：

同方案15。

联结方式：

同方案15。

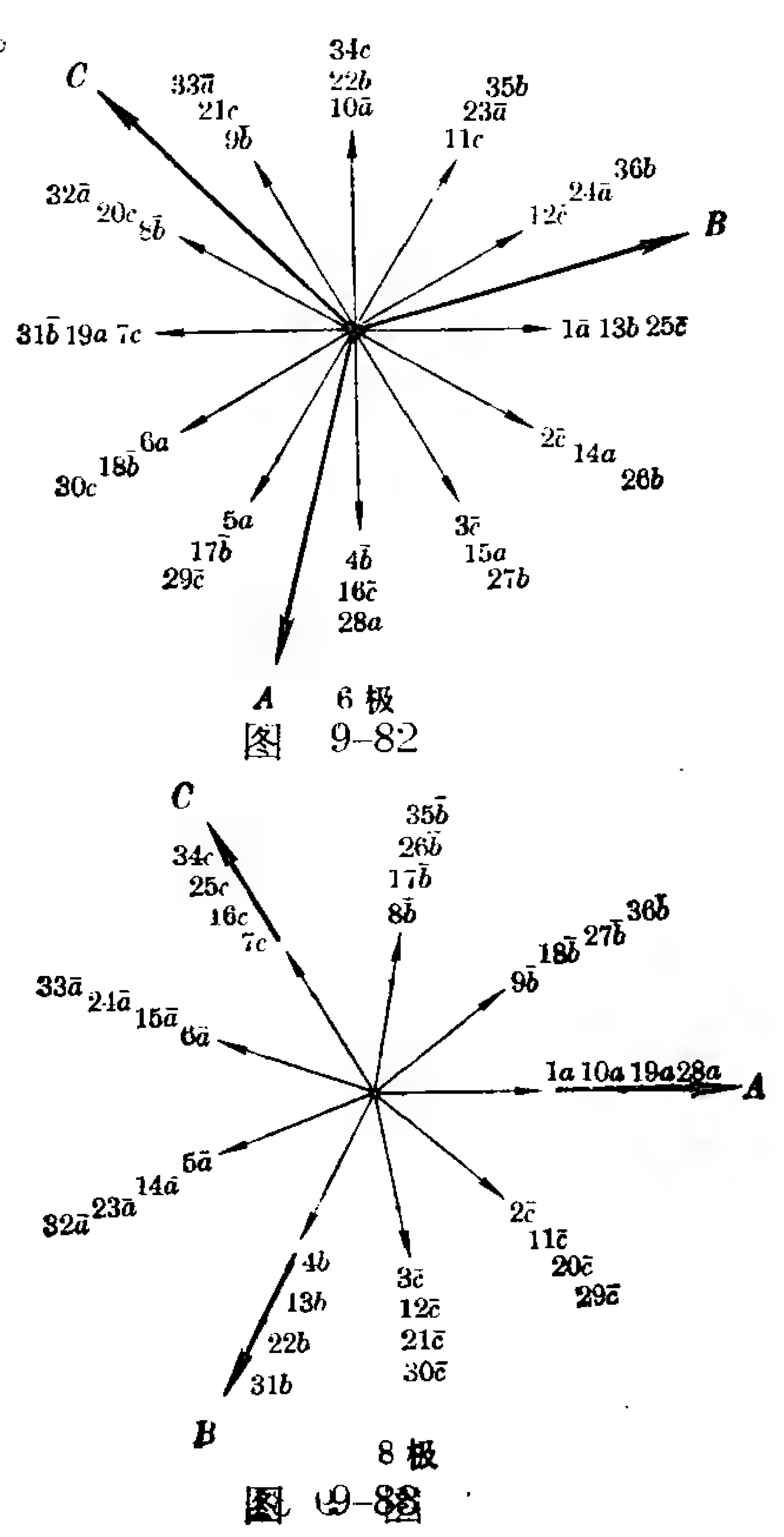


图　9-82

图　9-83

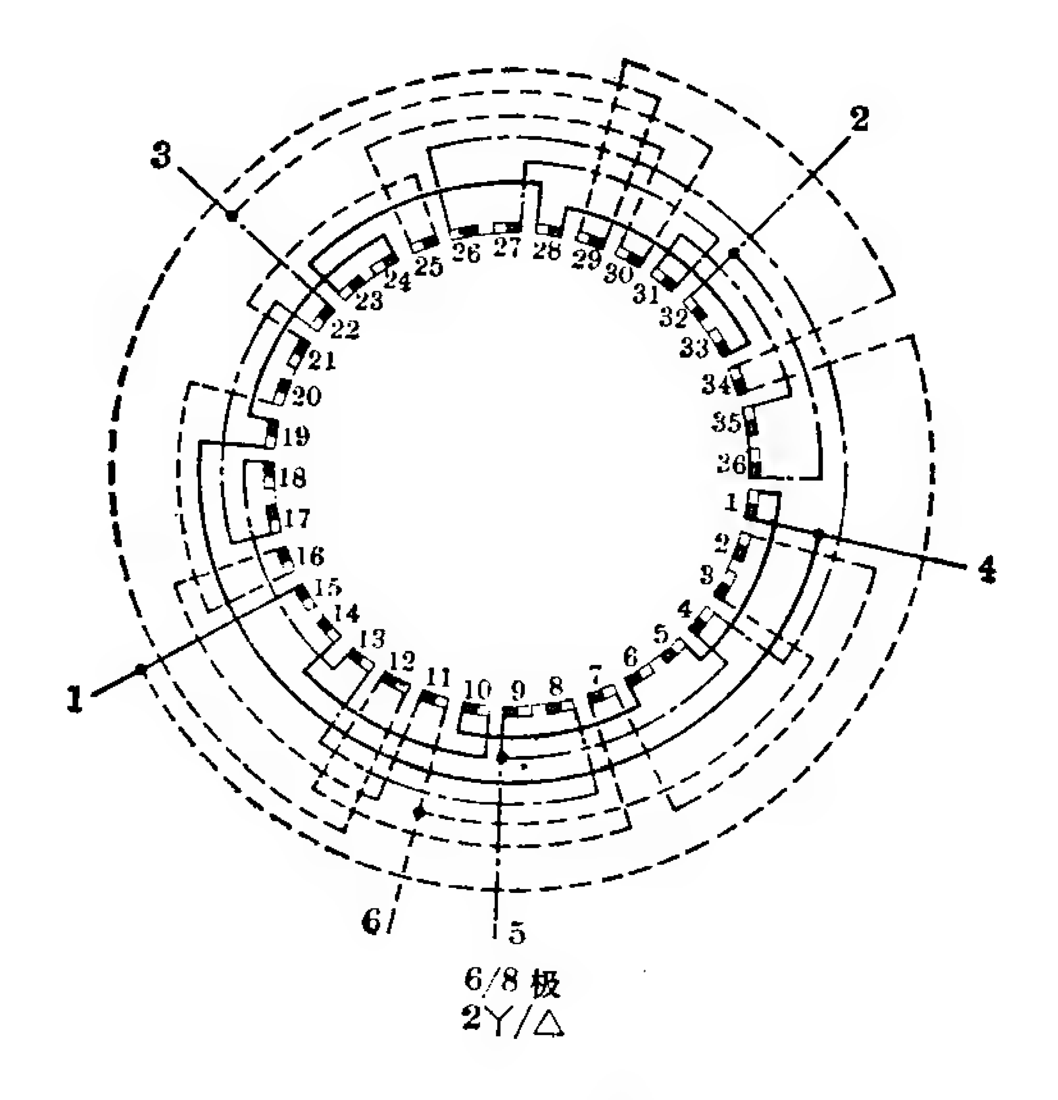


图 9-84

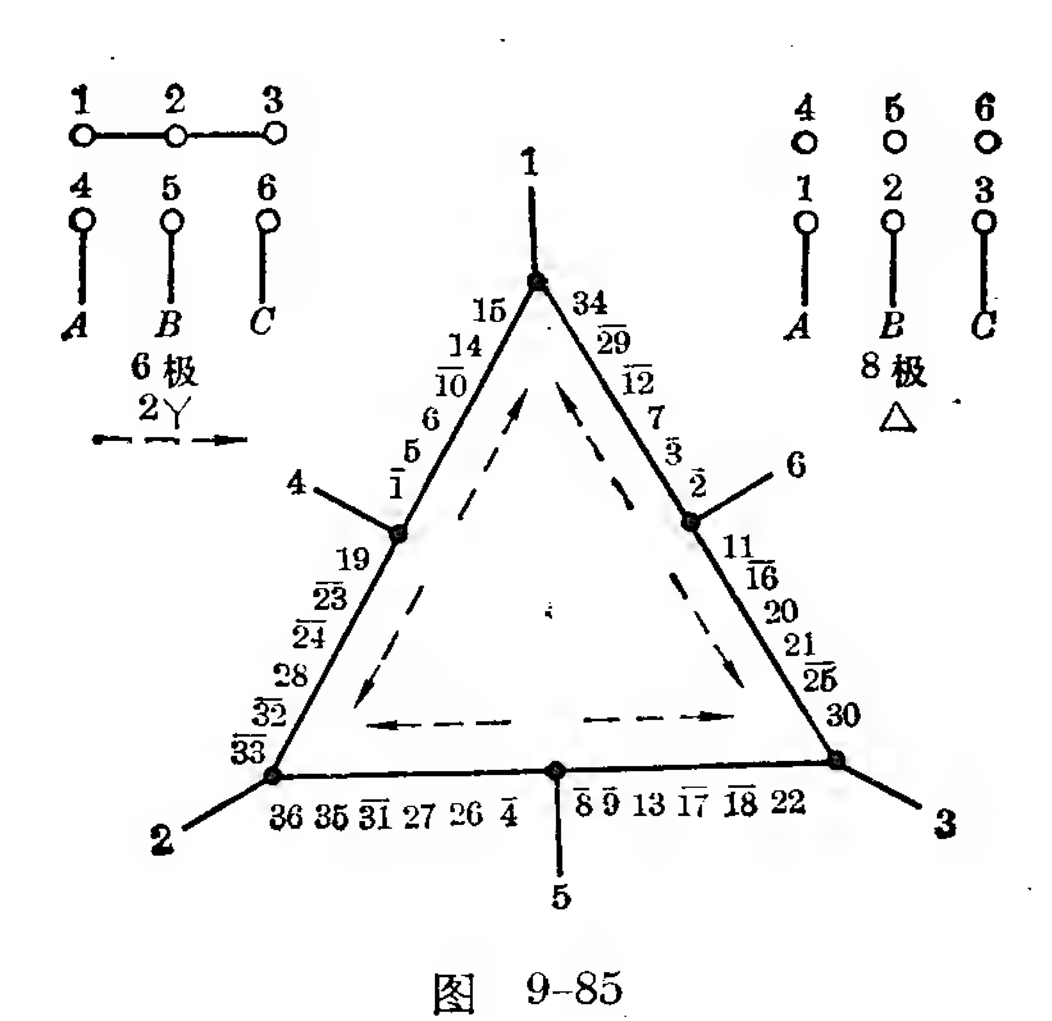


图 9-85

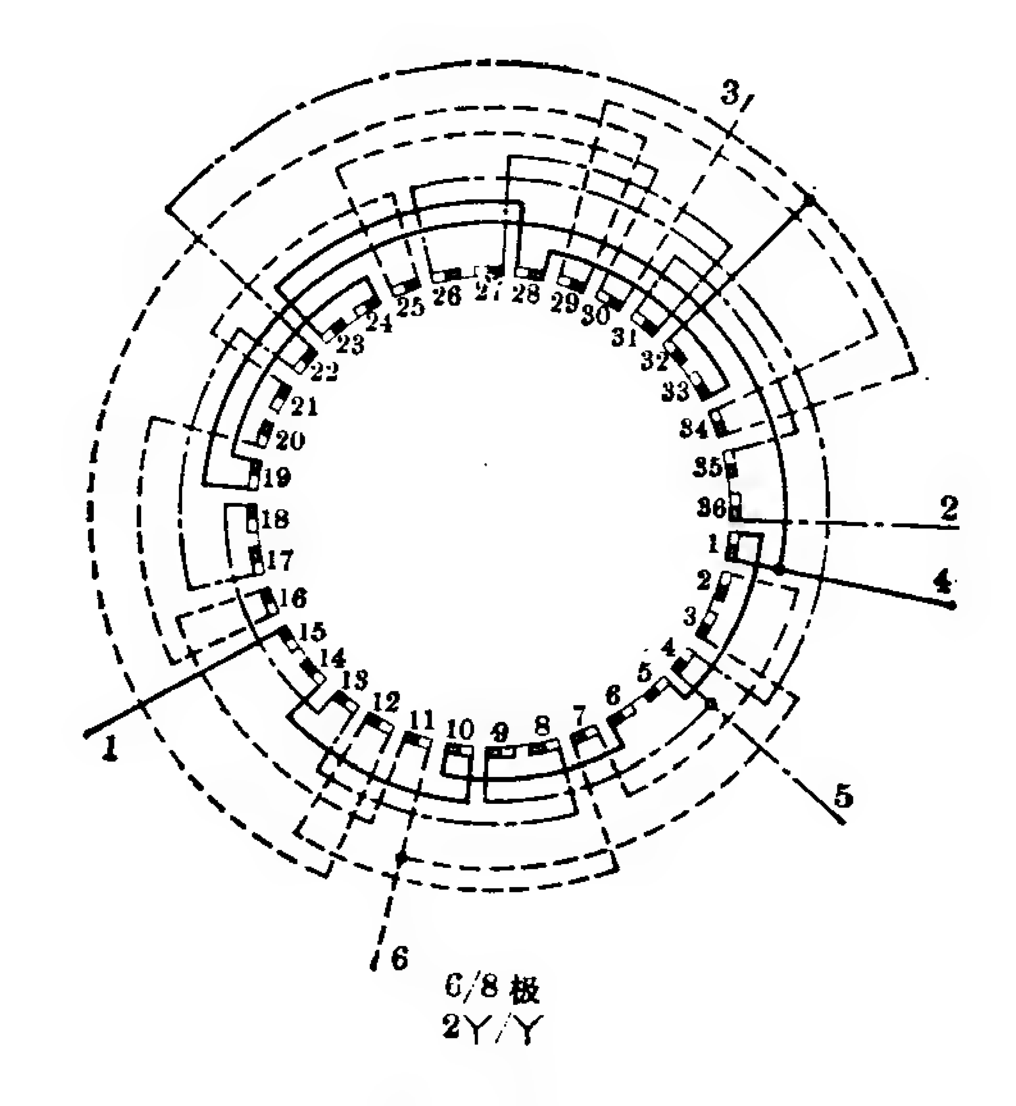


图 9-86

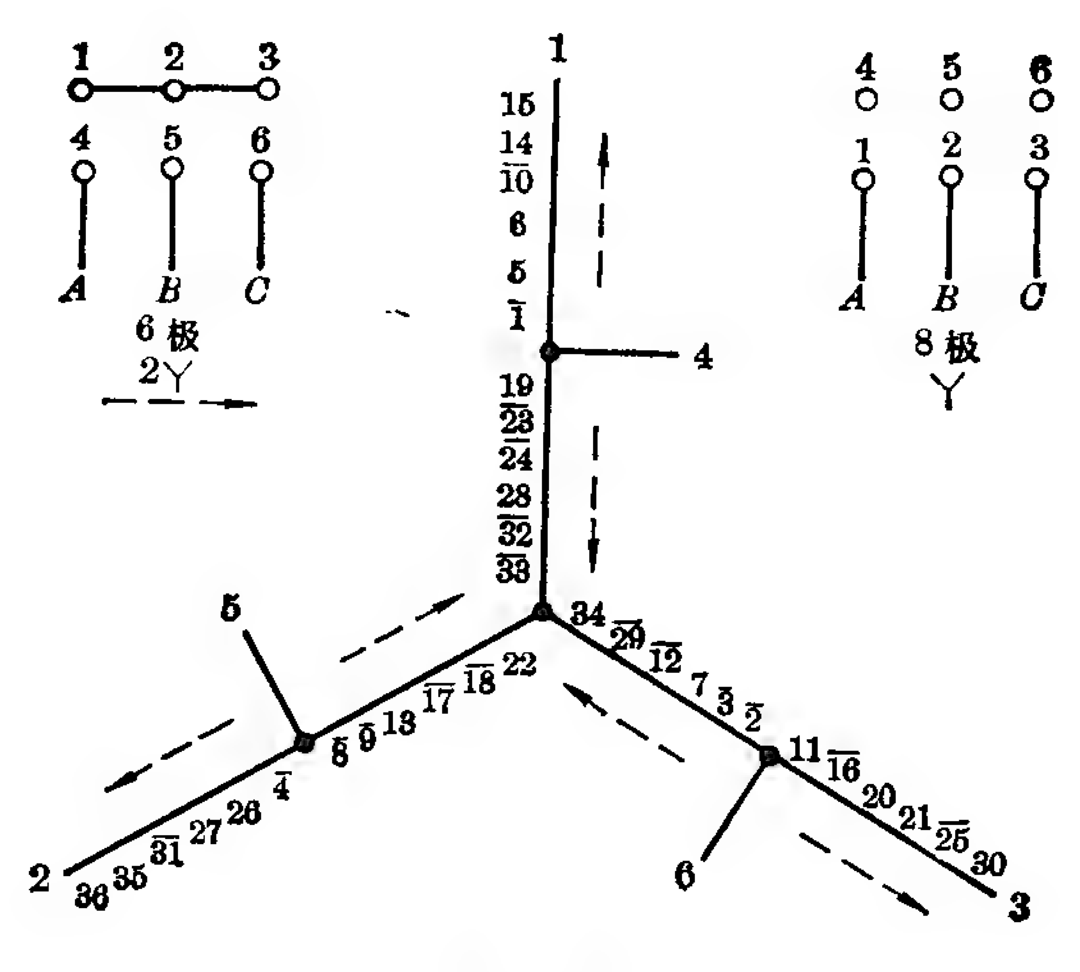


图 9-87

方案17　6/8极(定子36槽)之三

本方案为不规则分布同转向方案，两个极数均有较高的绕组系数，适合于要求两个极数的功率接近的场合。

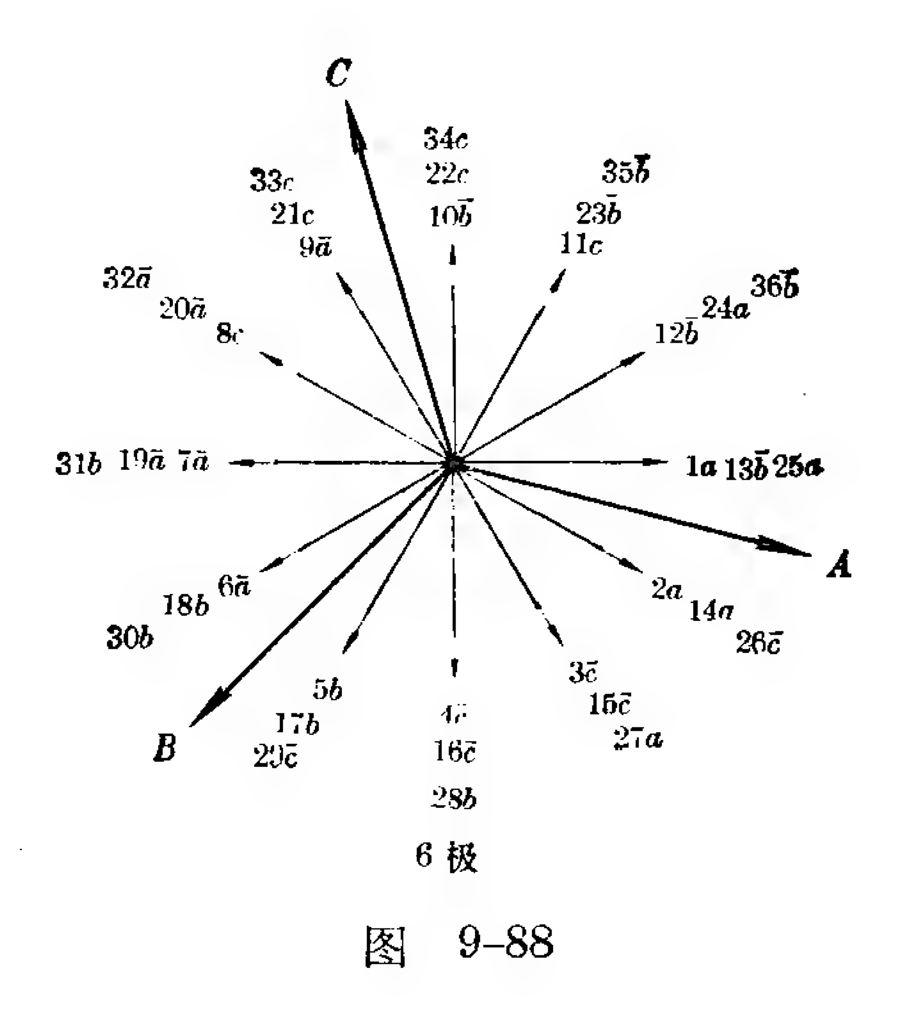
绕组系数：(跨距1—6)

六极——$K_d=0.88$　$K_y=0.966$　$K_{dy}=0.85$

八极——$K_d=0.83$　$K_y=0.985$　$K_{dy}=0.82$

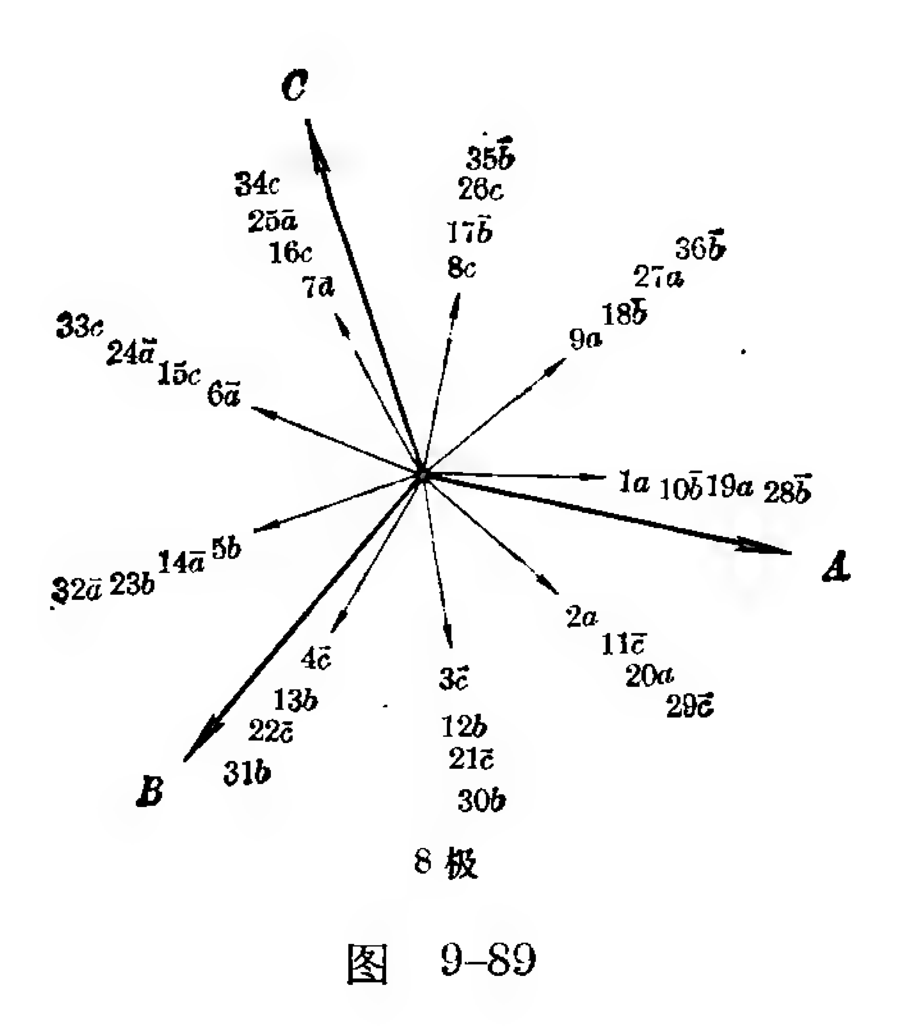
联结方式：

2Y/△，引出线6根。



6 极

图 9-88



8 极

图 9-89

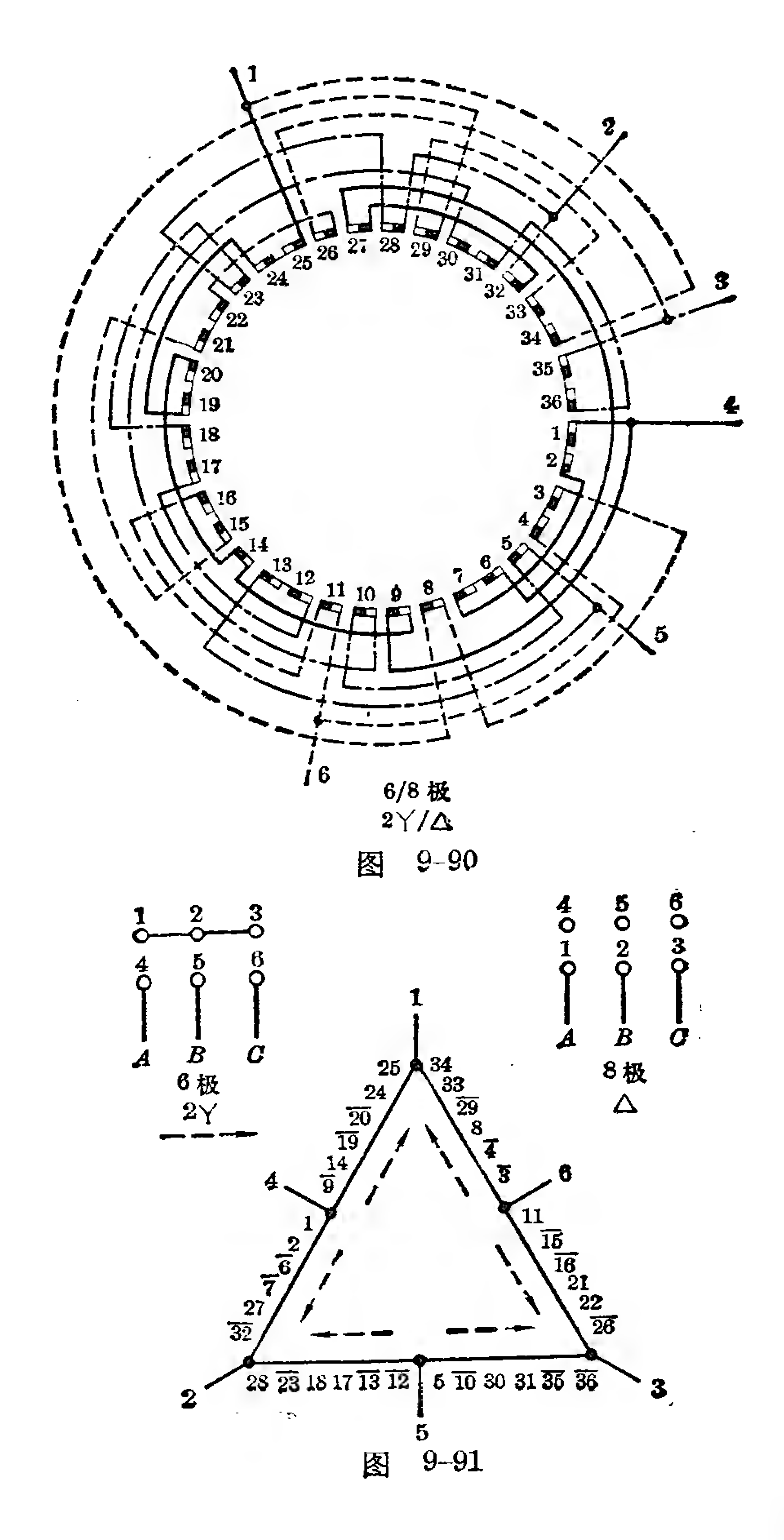


图 9-90

图 9-91

方案 18　6/8 极(定子 36 槽)之四

本方案为不规则分布反转向方案。性能与方案 17 相近，但起动转矩较其低。

绕组系数：(跨距 1—6)

同方案 17。

联结方式：

同方案 17。

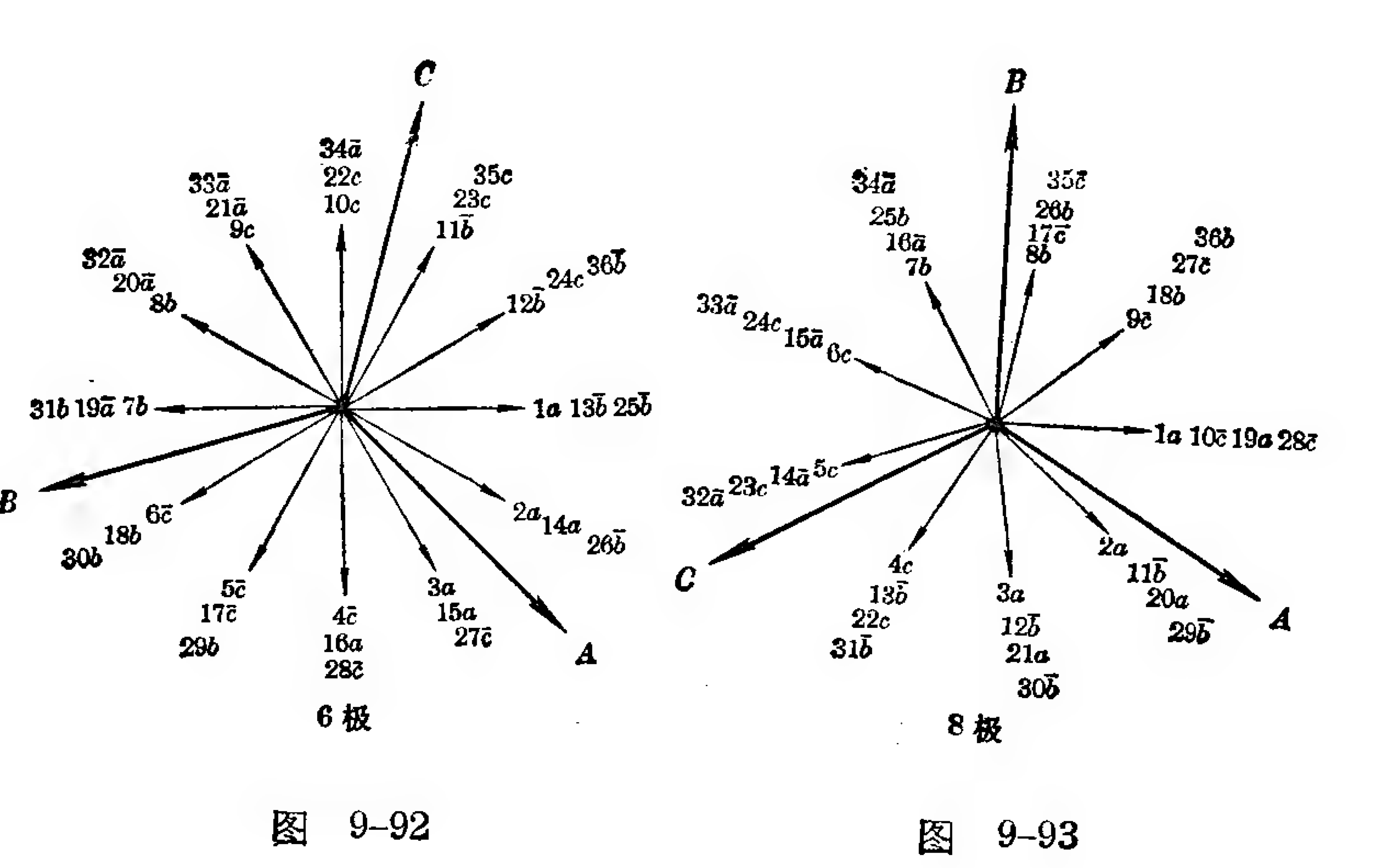


图　9-92　　　　图　9-93

6/8 极
2Y/△

图 9-94

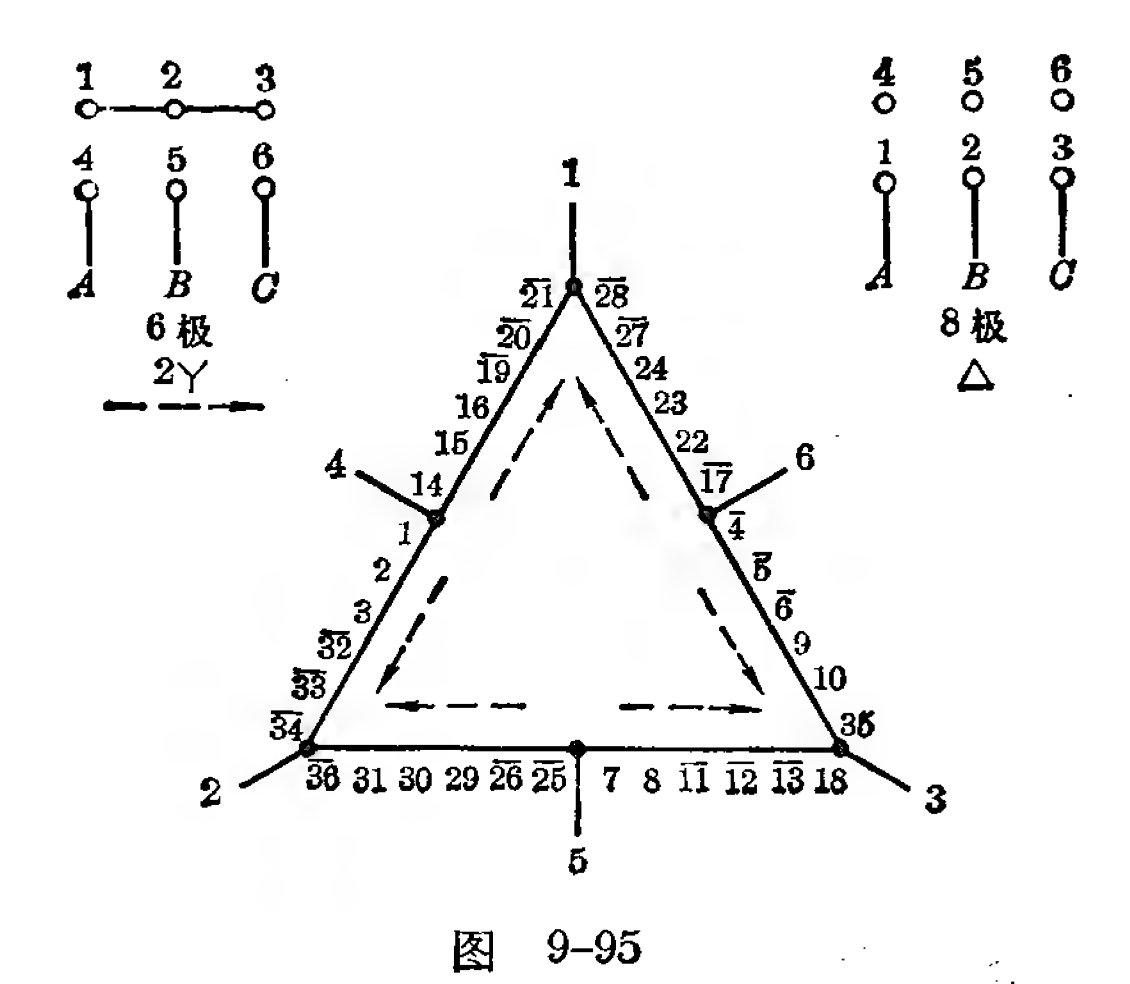


图 9-95

方案 19　6/8 极（定子 54 槽）

本方案六极为正规 60° 相带绕组，反向得八极。两个极数转向相同，类似可得反转向方案。

绕组系数：（跨距 1—7）

六极——$K_d=0.96$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.83$

八极——$K_d=0.62$　$K_y=0.985$　$K_{dy}=0.61$

联结方式：

2Y/△ 或 2Y/Y，引出线 6 根。

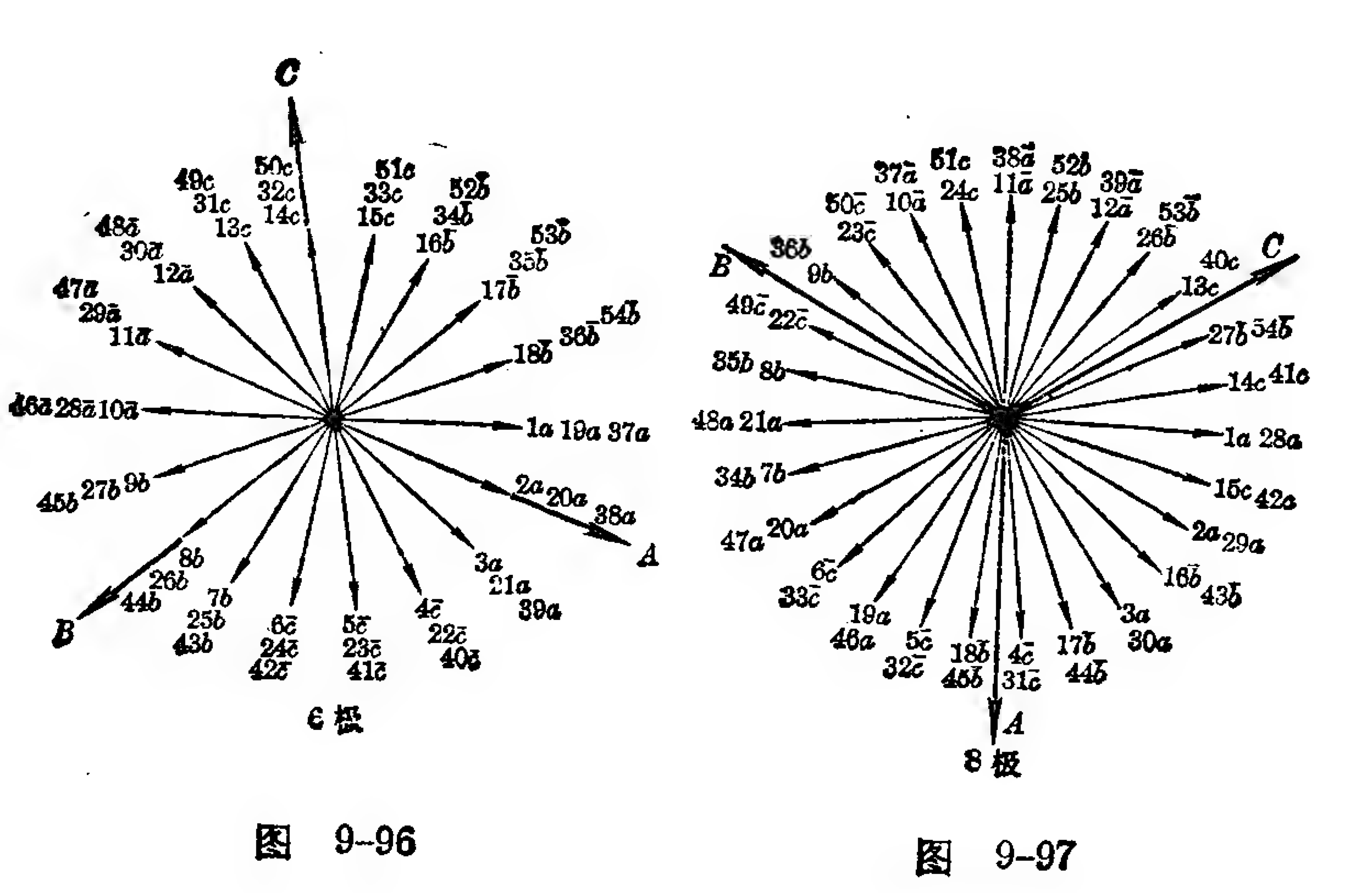


图　9-96　　　　图　9-97

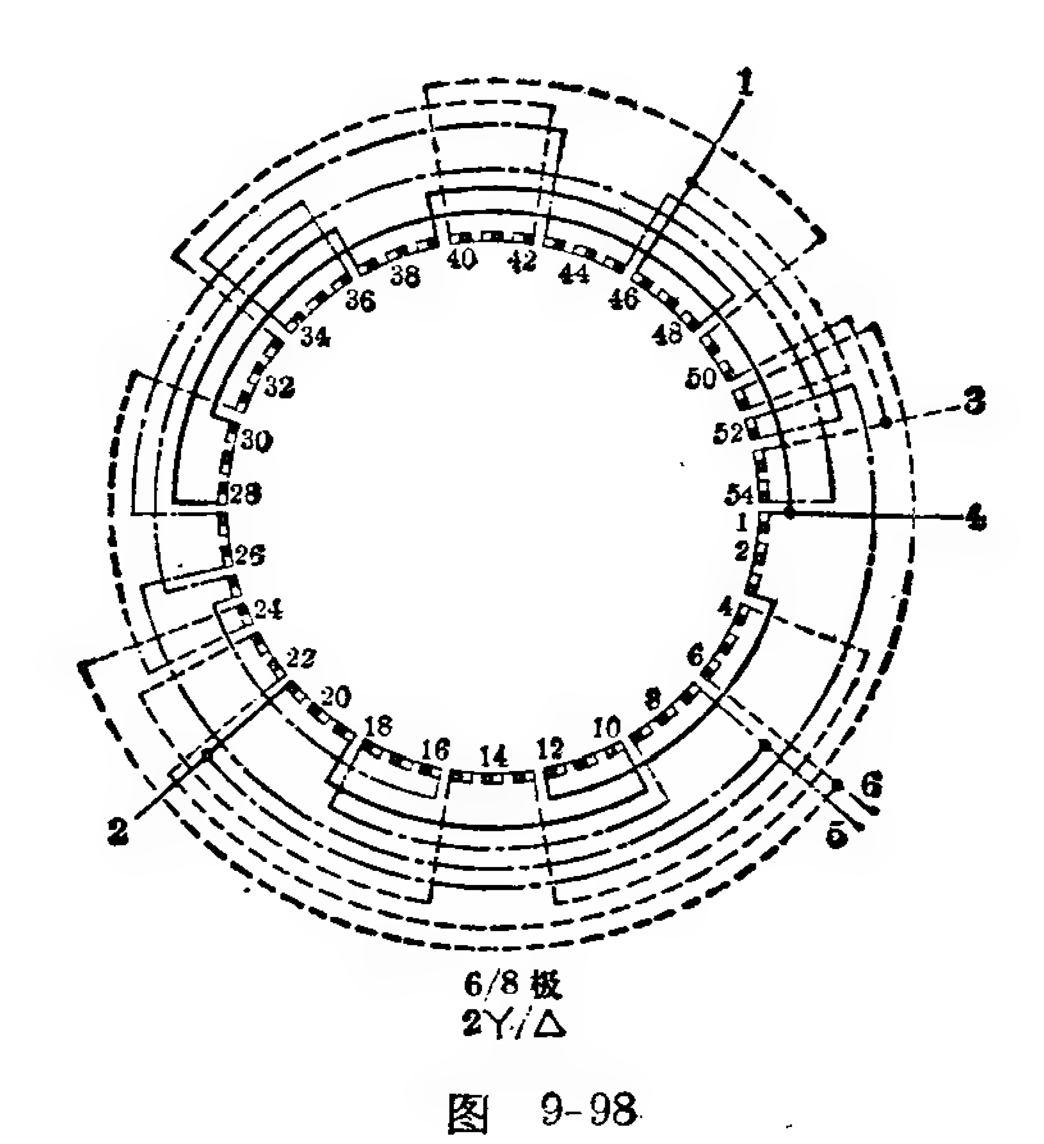


图 9-98

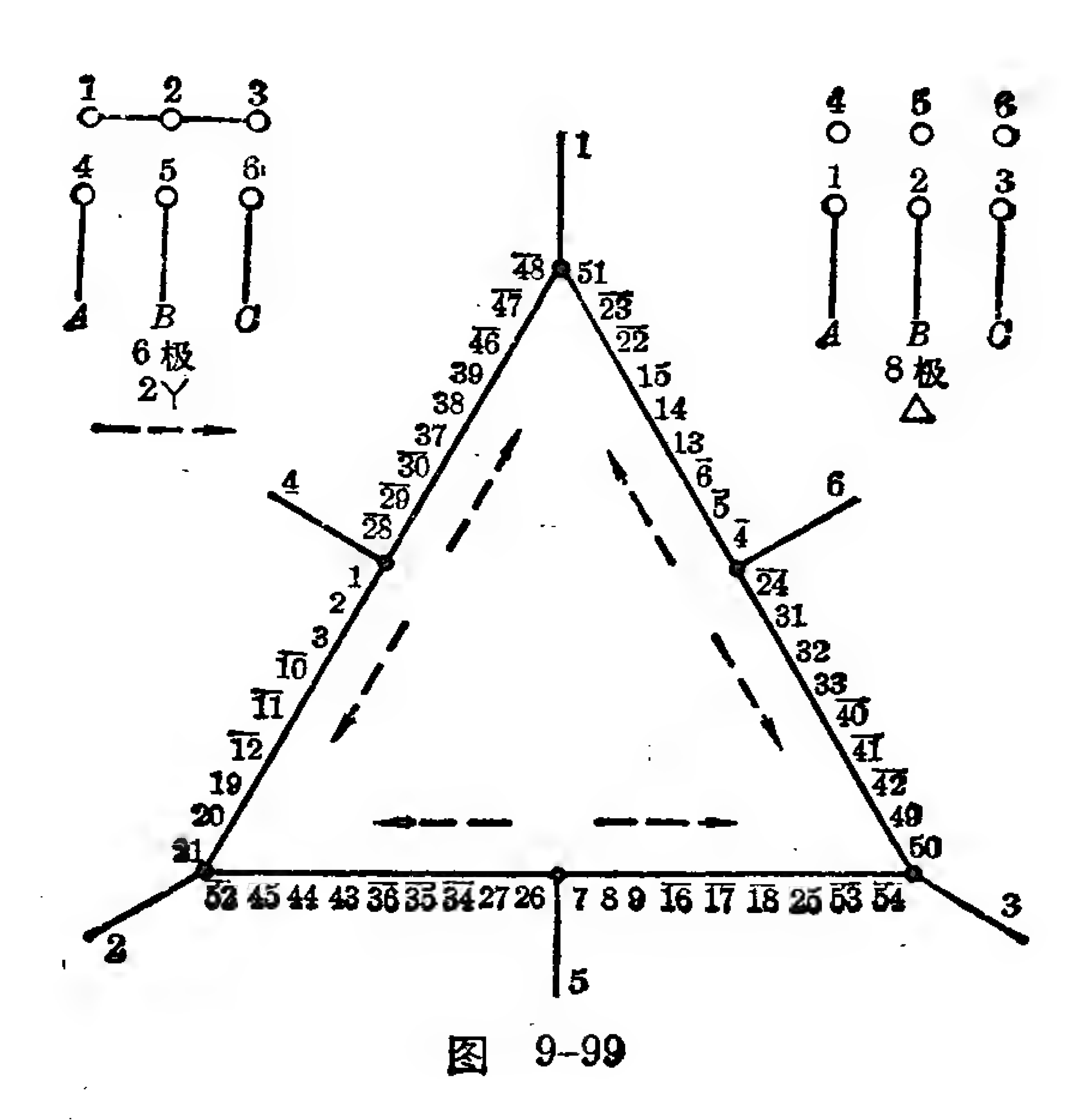


图 9-99

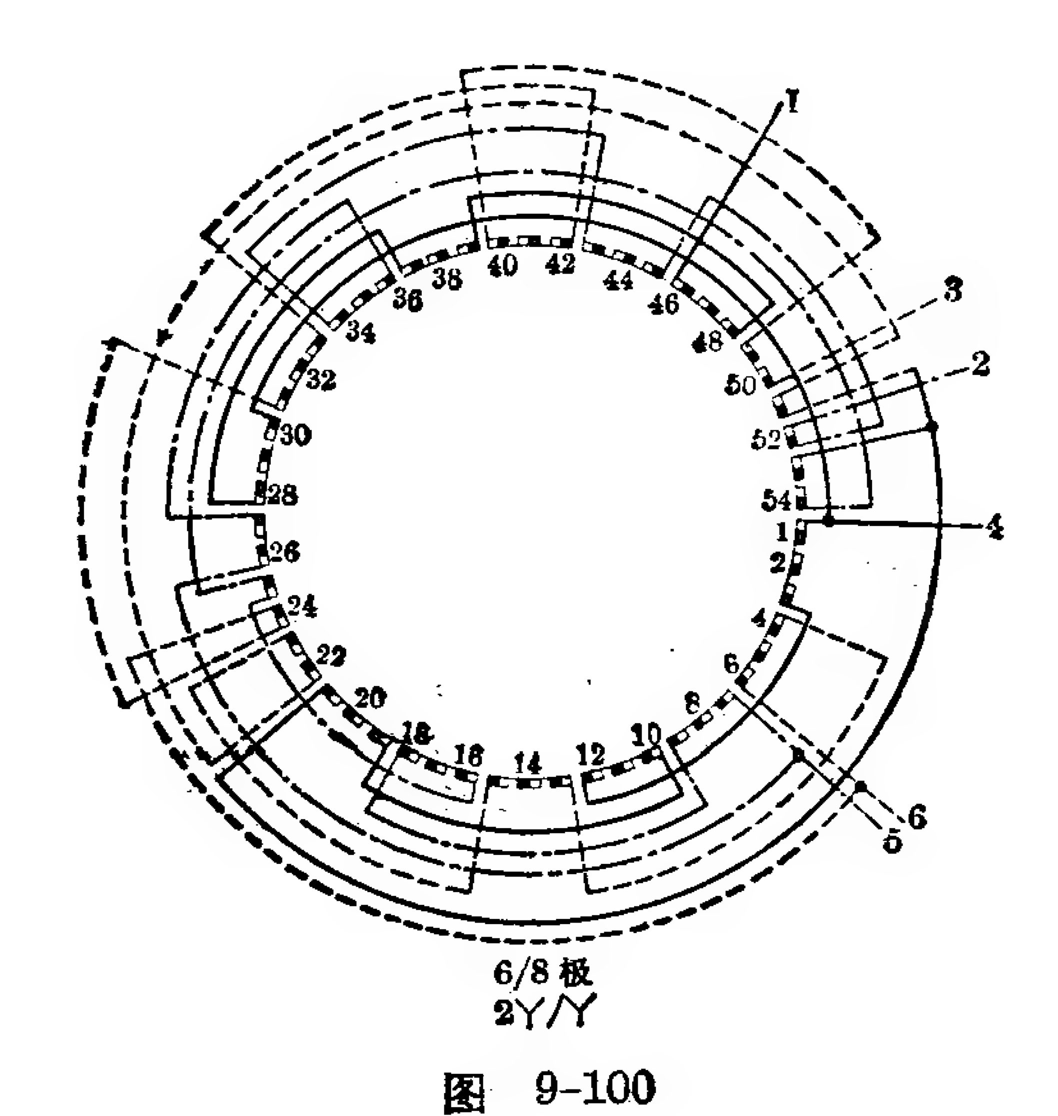


图 9-100

6 极
2Y

8 极
Y

图 9-101

方案 20　6/8 极(定子 72 槽)之一

本方案八极为正规 60° 相带绕组，反向得六极，两个极数的转向相同。跨距可根据对两个极数的出力要求决定。

本方案未经试制。

分布系数：

六极——$K_d=0.638$

八极——$K_d=0.96$

联结方式：

2Y/△ 或 2Y/Y，引出线 6 根。

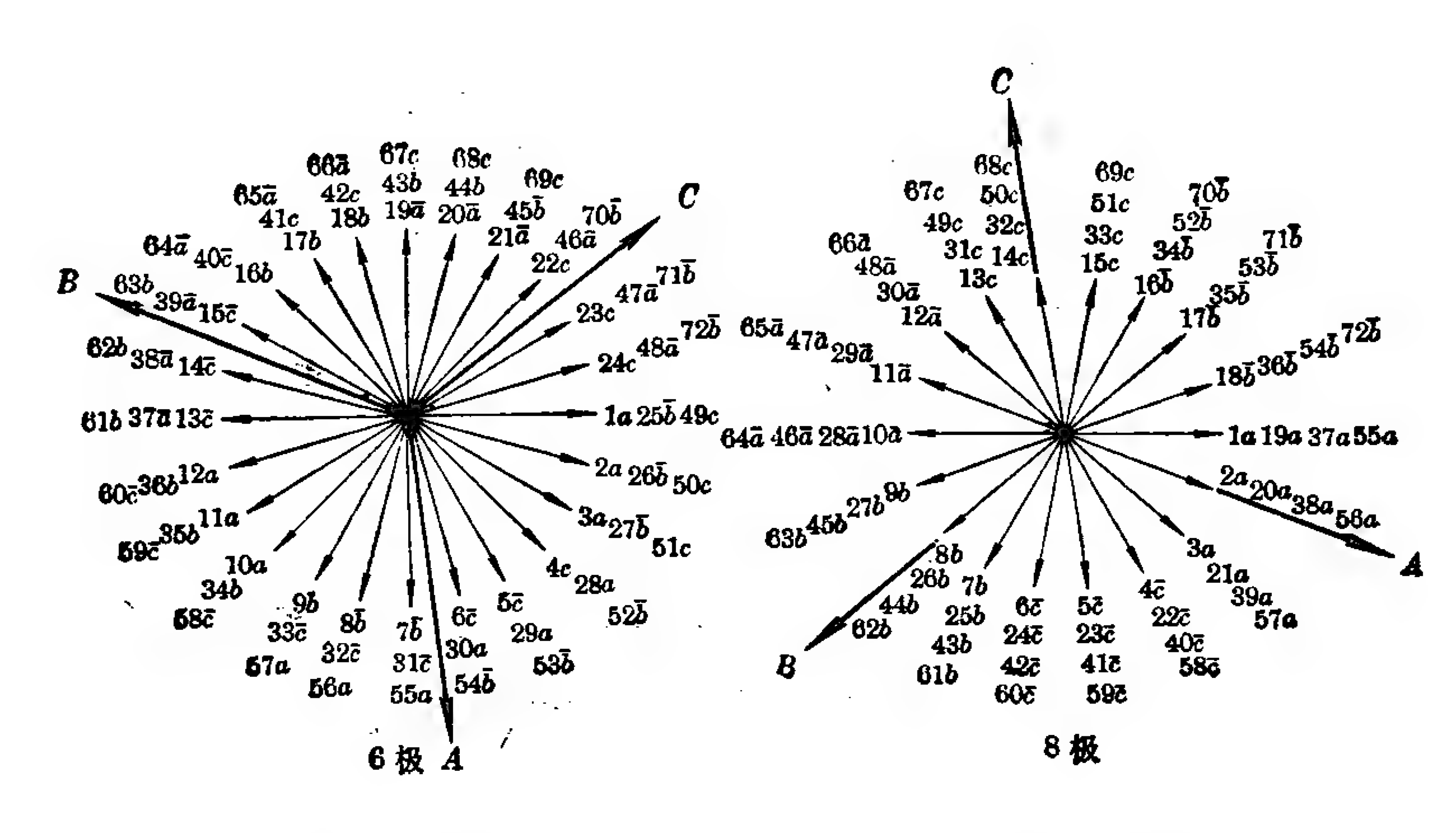


图　9-102　　　　图　9-103

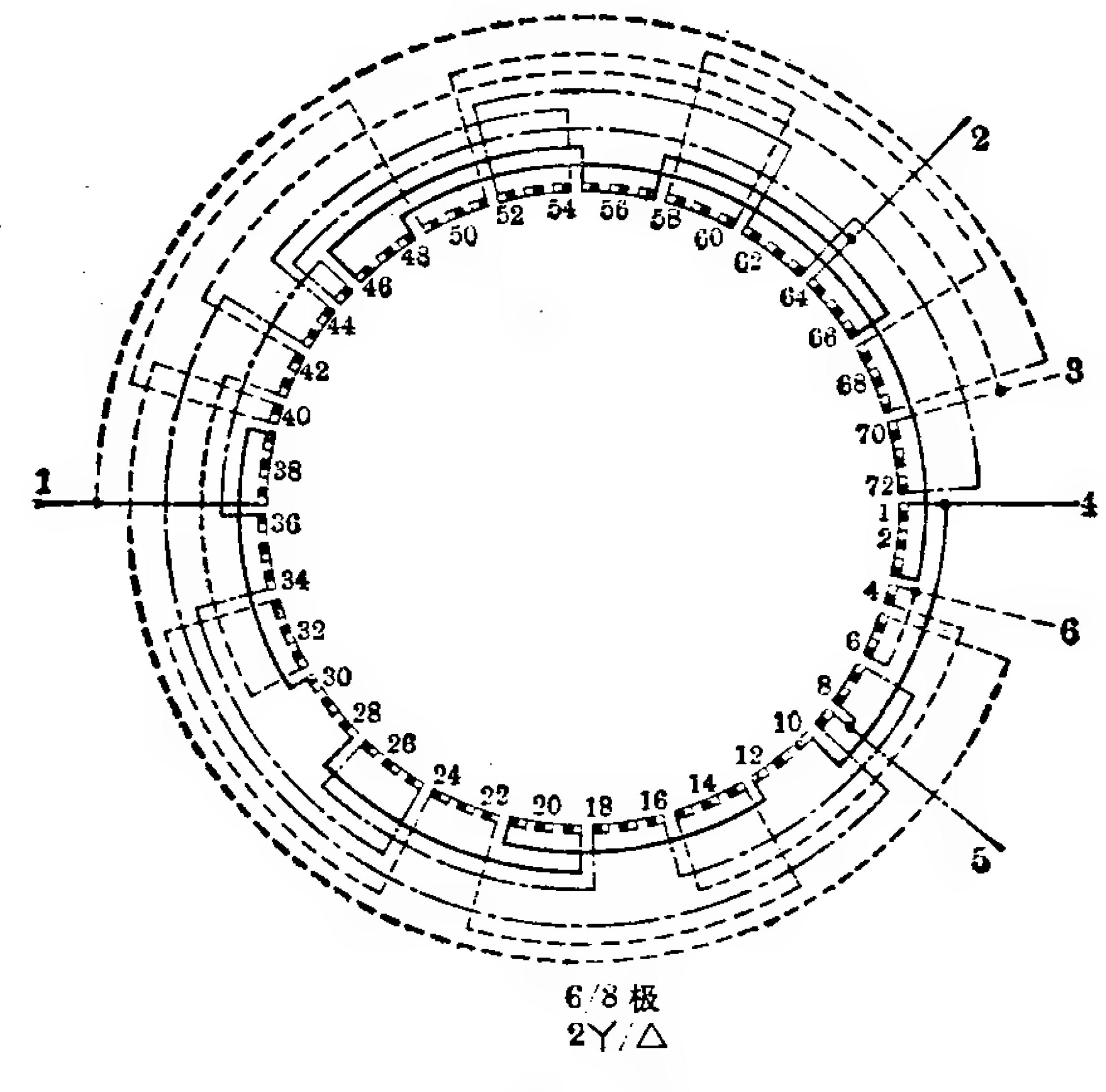


图 9-104

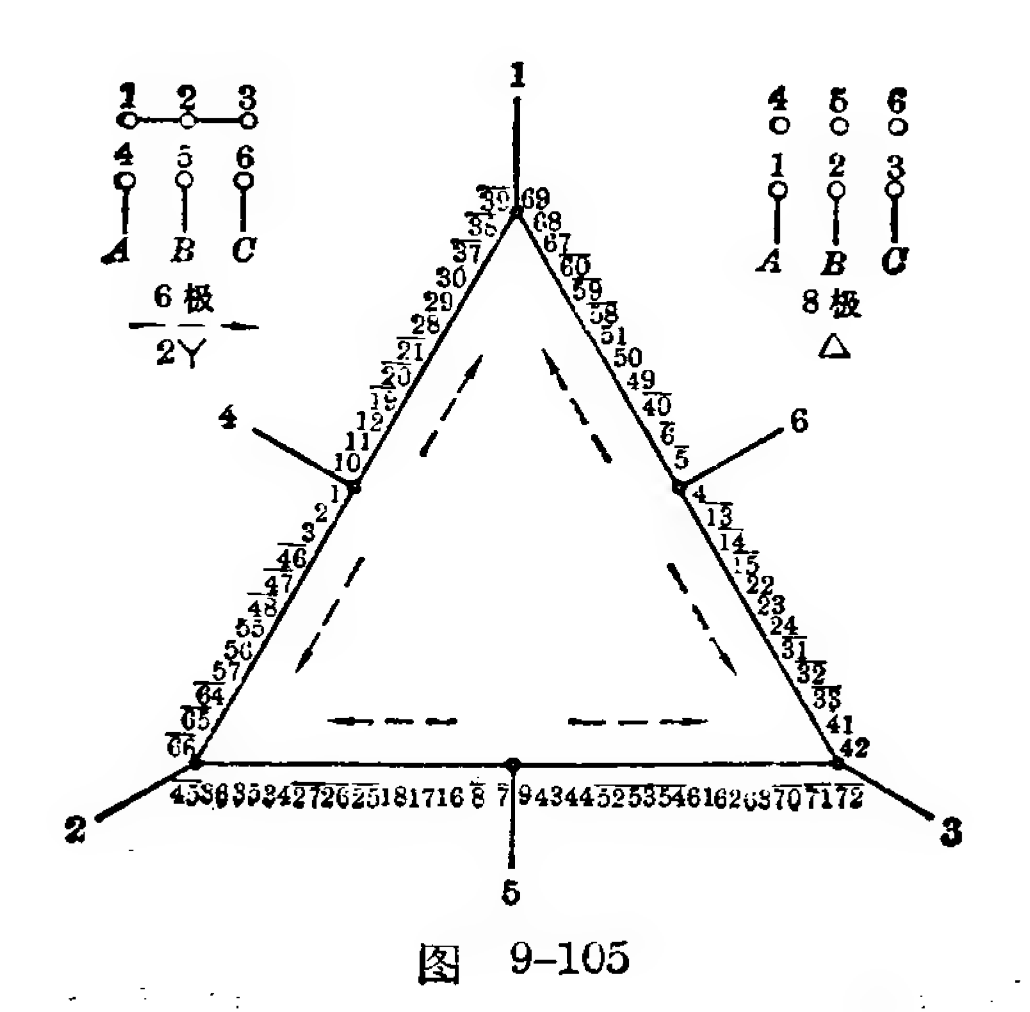


图 9-105

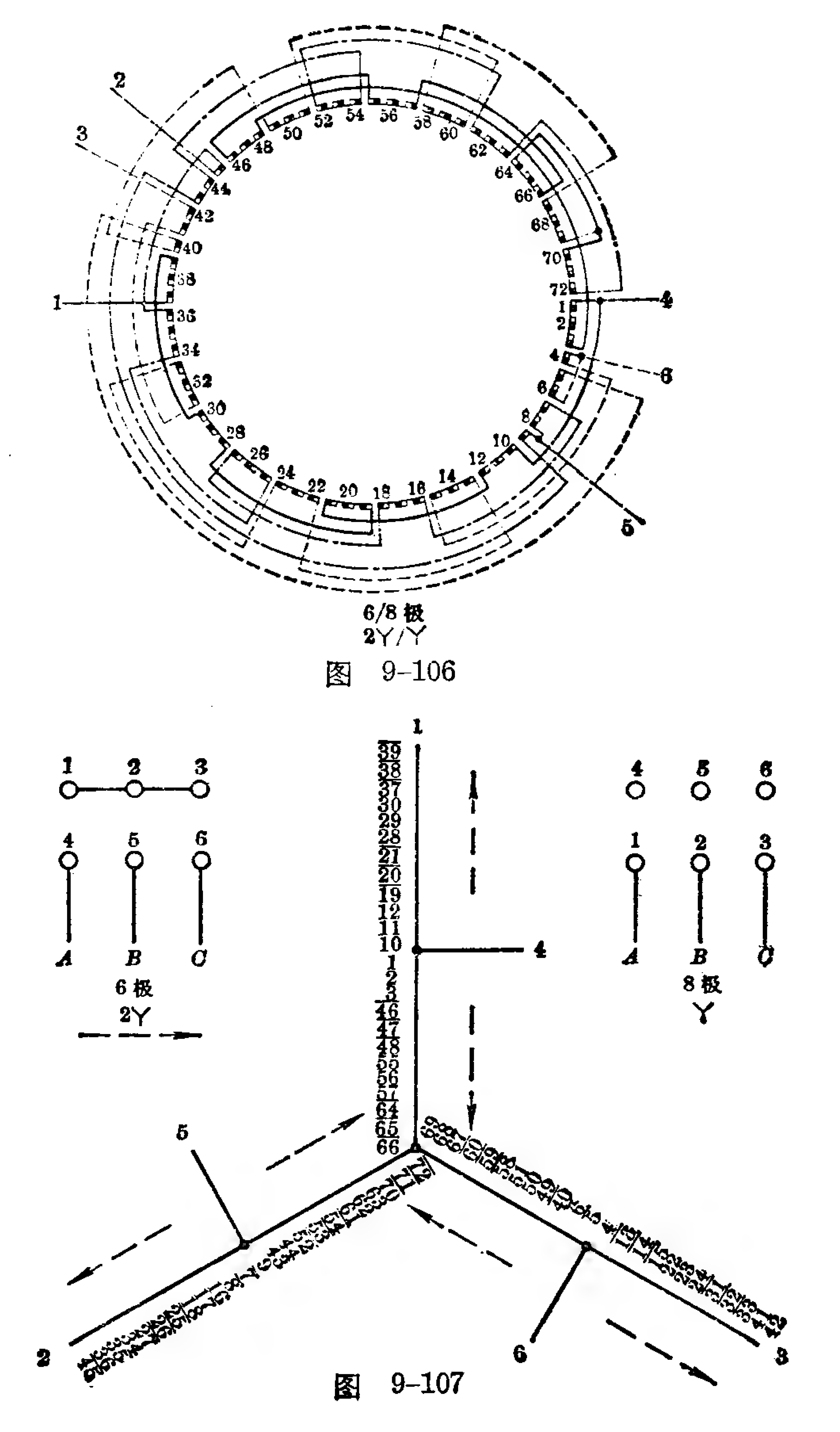


图 9-106

图 9-107

方案 21 6/8 极(定子 72 槽)之二

本方案八极矢量分布为 4 4 4 4 4 4; 反向得六极, 部分线圈分裂为两部分是为了使六极绕组三相获得对称; 两个极数的转向相反。

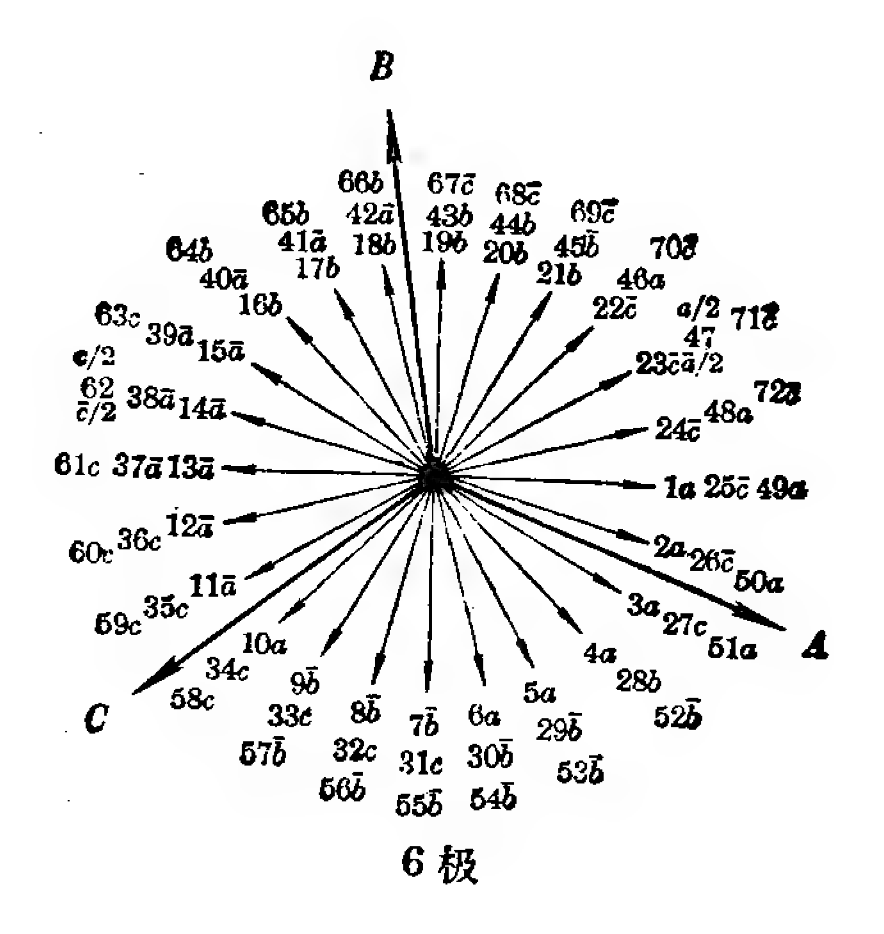
绕组系数: (跨距 1—9)

六极——$K_d=0.77$ $K_y=0.866$ $K_{dy}=0.67$

八极——$K_d=0.831$ $K_y=0.985$ $K_{dy}=0.817$

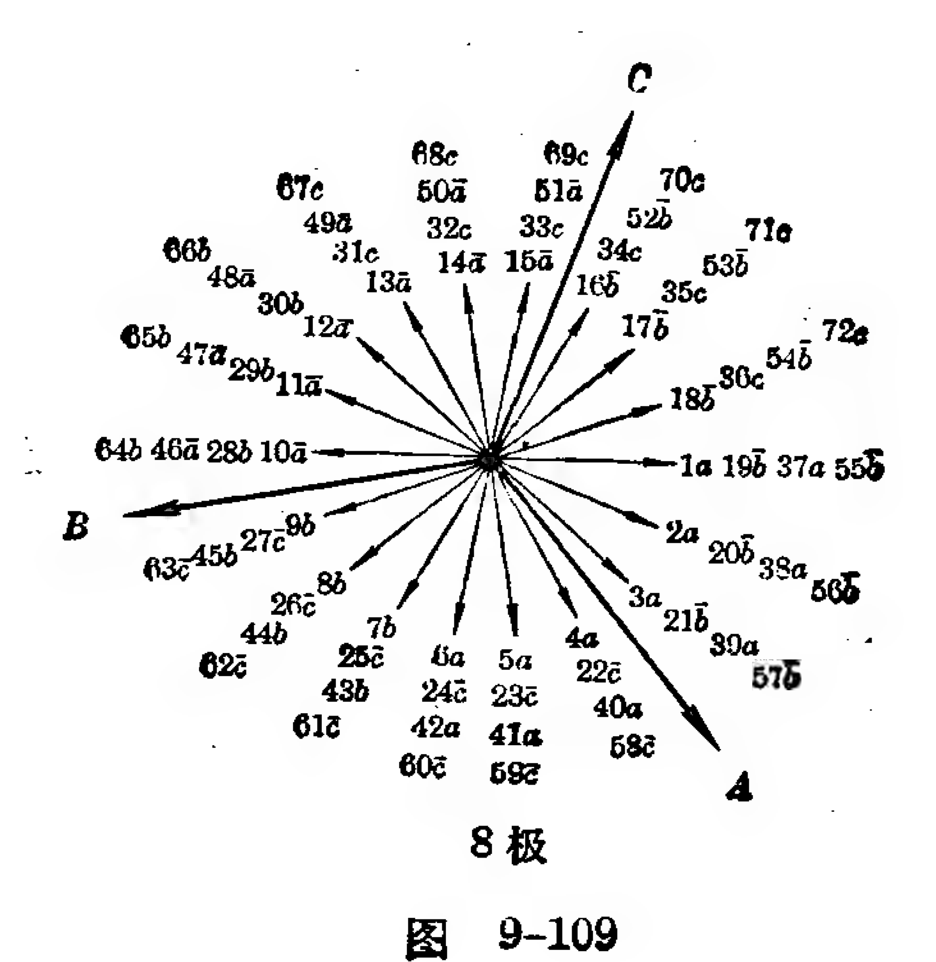
联结方式:

2Y/△ 或 2Y/Y, 引出线 6 根。



6 极

图 9-108



8 极

图 9-109

6/8 极
2Y/△

图 9-110

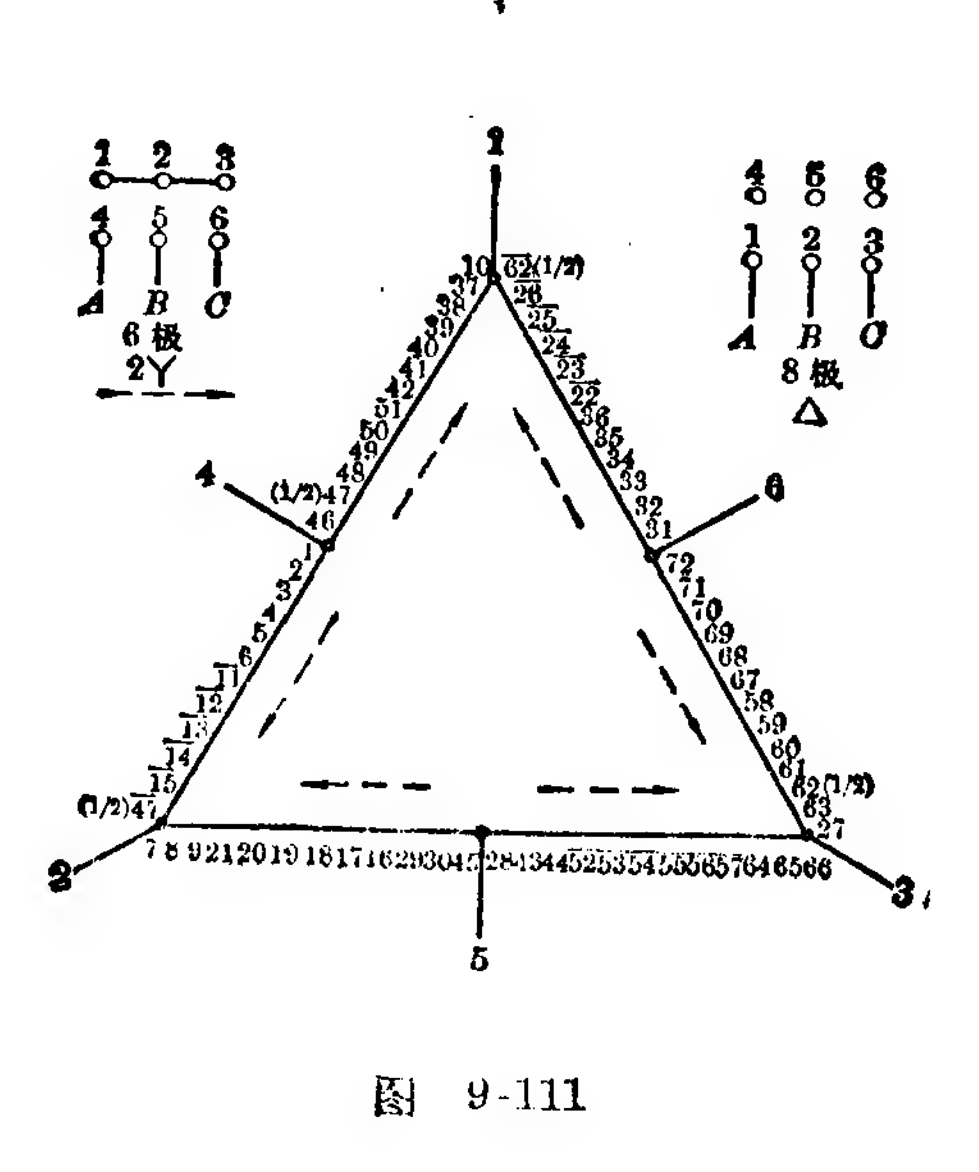


图 9-111

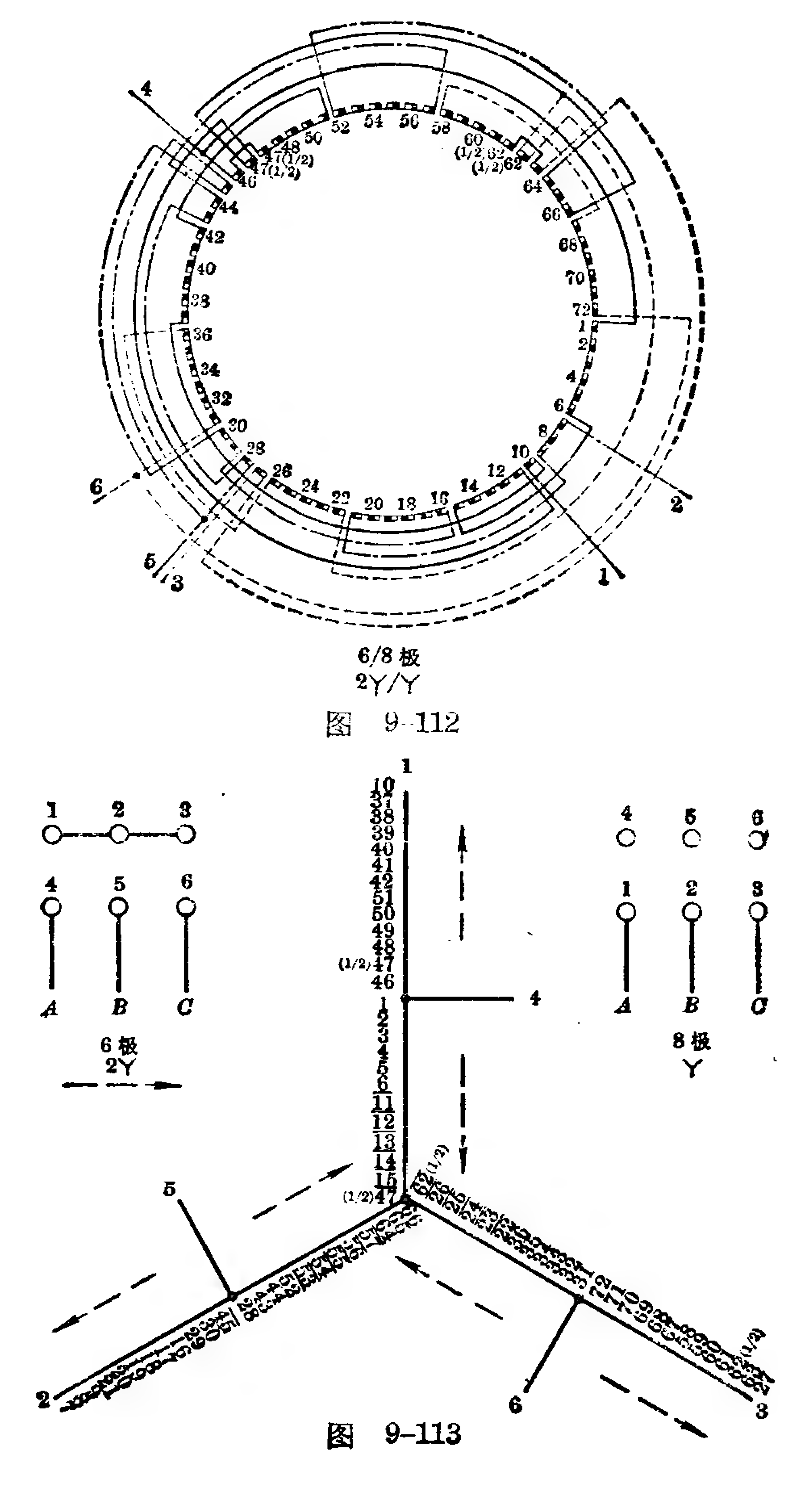


图 9-112

图 9-113

方案22　2/4/6极(定子36槽)

本方案系用换相法变极，两、四极采用△接法，六极为3Y接法。三个极数的转向相同。

绕组系数：(跨距1—7)

两极——$K_{dY}=0.981$　　$K_{dyY}=0.49$

$K_y=0.5$

$K_{d\triangle}=0.966$　　$K_{dy\triangle}=0.483$

四极——$K_{dY}=0.925$　　$K_{dyY}=0.80$

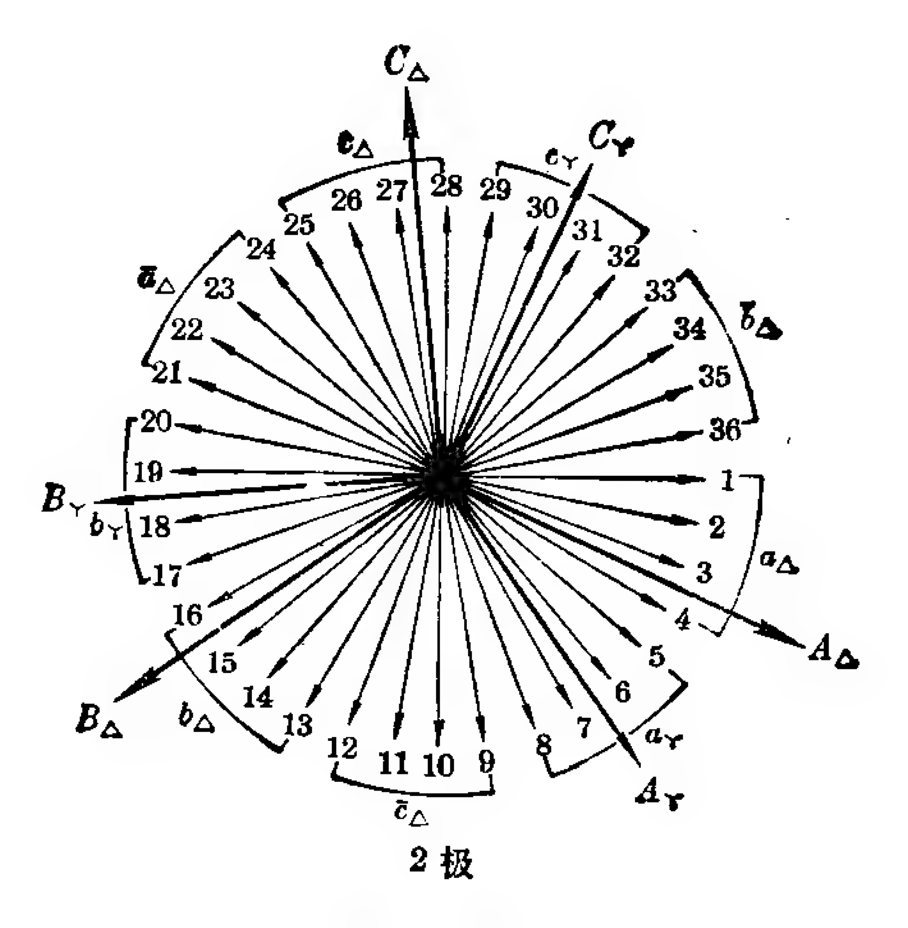
$K_y=0.866$

$K_{d\triangle}=0.911$　　$K_{dy\triangle}=0.79$

六极——$K_d=0.836$　$K_y=1$　　$K_{dy}=0.836$

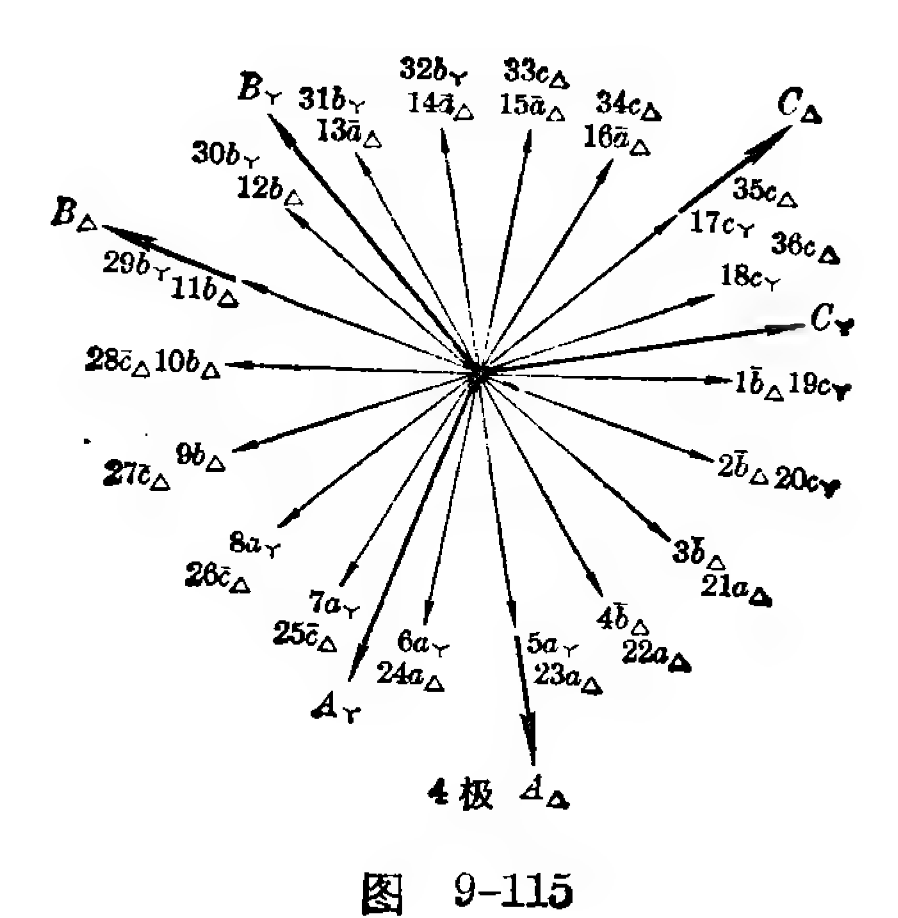
联结方式：

△/△/3Y，引出线13根。



$C_\triangle$
$c_\triangle$
c_Y
C_Y
25 26 27 28 29 30 31 32
$\bar{a}_\triangle$
24 23 22 21
33 34 35 36
$\bar{b}_\triangle$
20 19 18 17
B_Y
b_Y
1 2 3 4
$a_\triangle$
$A_\triangle$
16 15 14 13
$B_\triangle$
$b_\triangle$
5 6 7 8
a_Y
A_Y
12 11 10 9
$\bar{c}_\triangle$
2 极

图 9-114



B_Y
$31b_Y$ $13\bar{a}_\triangle$
$32b_Y$ $14\bar{a}_\triangle$
$33c_\triangle$ $15\bar{a}_\triangle$
$34c_\triangle$ $16\bar{a}_\triangle$
$C_\triangle$
$30b_Y$ $12b_\triangle$
$35c_\triangle$
$17c_Y$
$36c_\triangle$
$B_\triangle$
$29b_Y$ $11b_\triangle$
$18c_Y$
C_Y
$28\bar{c}_\triangle$ $10b_\triangle$
$1\bar{b}_\triangle$ $19c_Y$
$27\bar{c}_\triangle$ $9b_\triangle$
$2\bar{b}_\triangle$ $20c_Y$
$8a_Y$ $26\bar{c}_\triangle$
$3\bar{b}_\triangle$ $21a_\triangle$
$7a_Y$ $25\bar{c}_\triangle$
$6a_Y$ $24a_\triangle$
$5a_Y$ $23a_\triangle$
$4\bar{b}_\triangle$ $22a_\triangle$
A_Y
4 极
$A_\triangle$

图 9-115

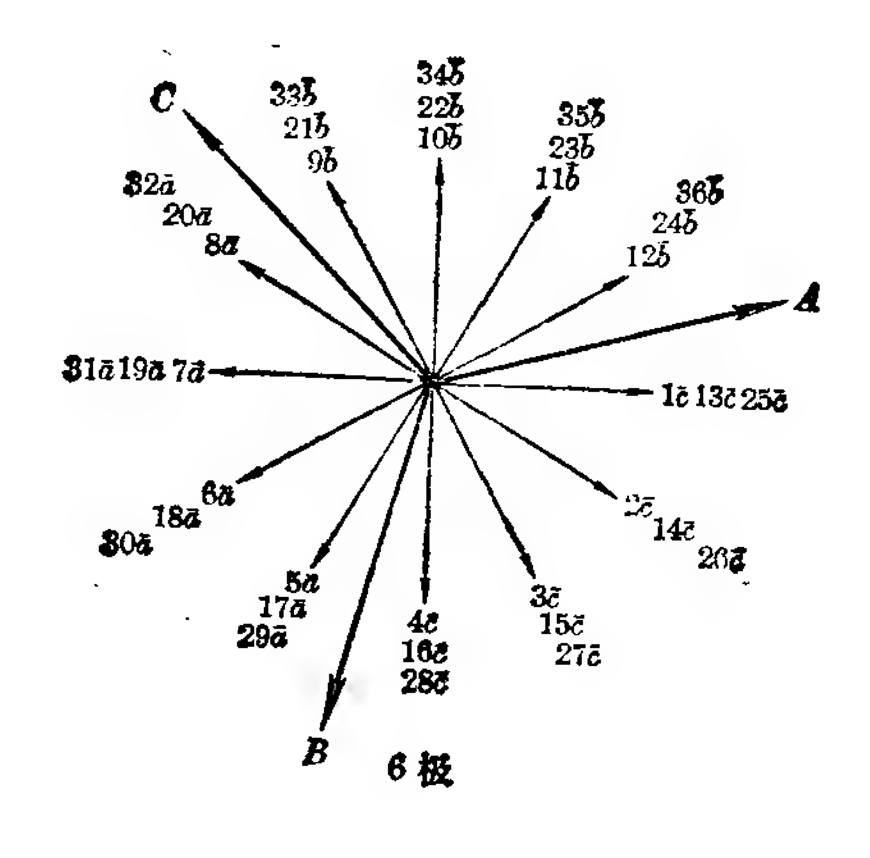


图 9-116

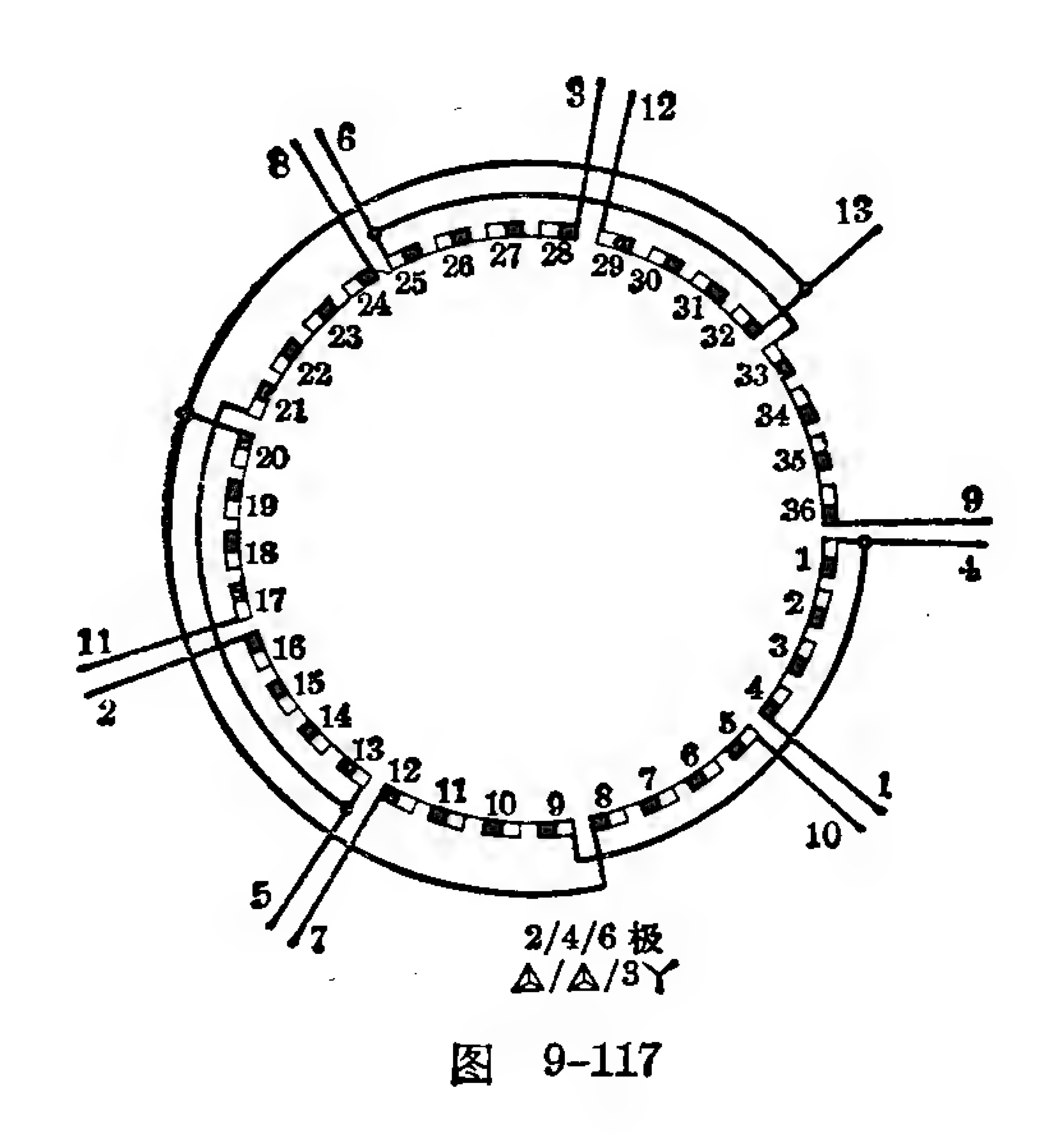


图 9-117

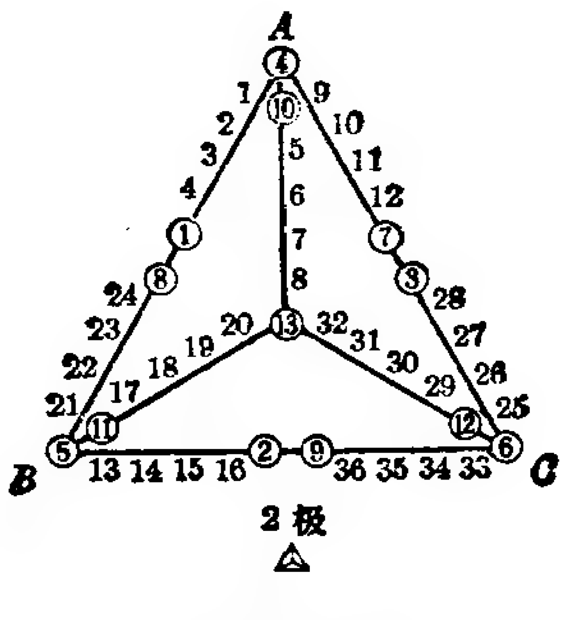


图 9-118

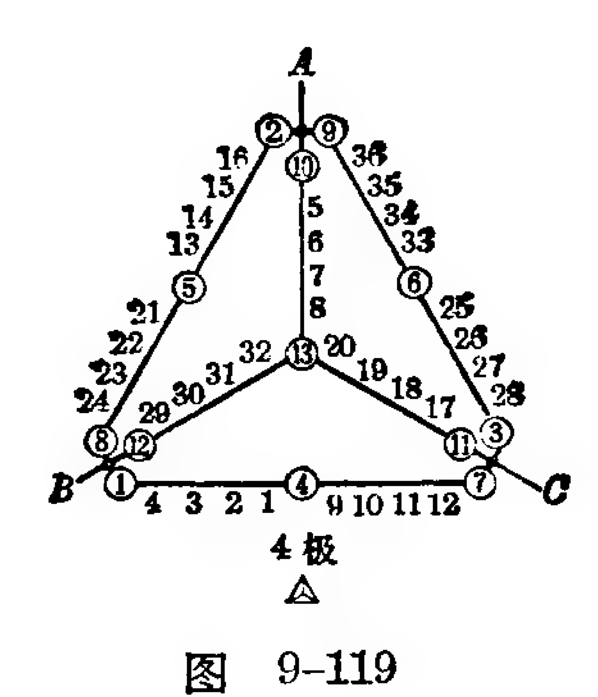


图 9-119

6 极
3Y

图 9-120

方案 23　2/4/8 极(定子 36 槽)之一

本方案两、四极系用换相法变极，八极则在四极基础上采用庶极接法获得。两、四极转向相同，八极转向相反。

绕组系数：(跨距 1—7)

两极——$K_d=0.956$　$K_y=0.5$　$K_{dy}=0.478$

四极——$K_d=0.96$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.831$

八极——$K_d=0.844$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.731$

联结方式：

2△/2△/2Y，引出线 12 根。

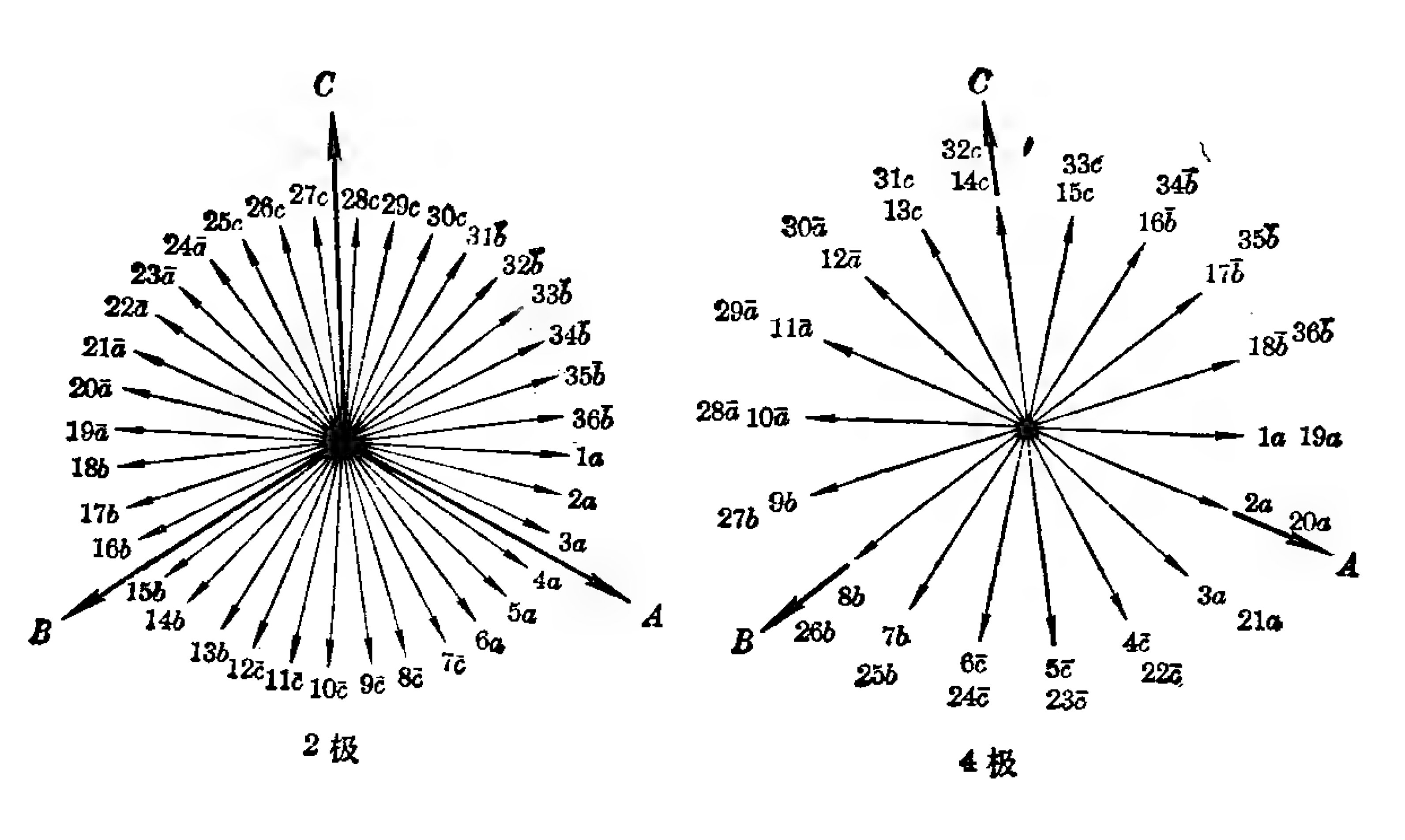
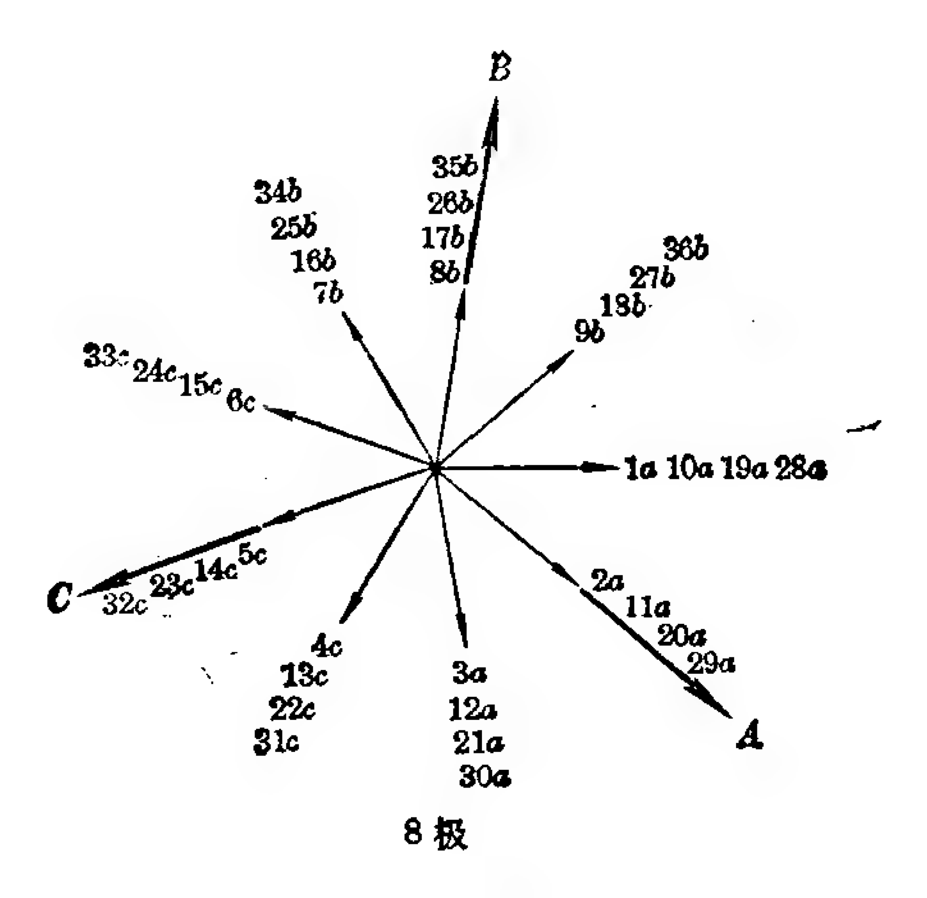


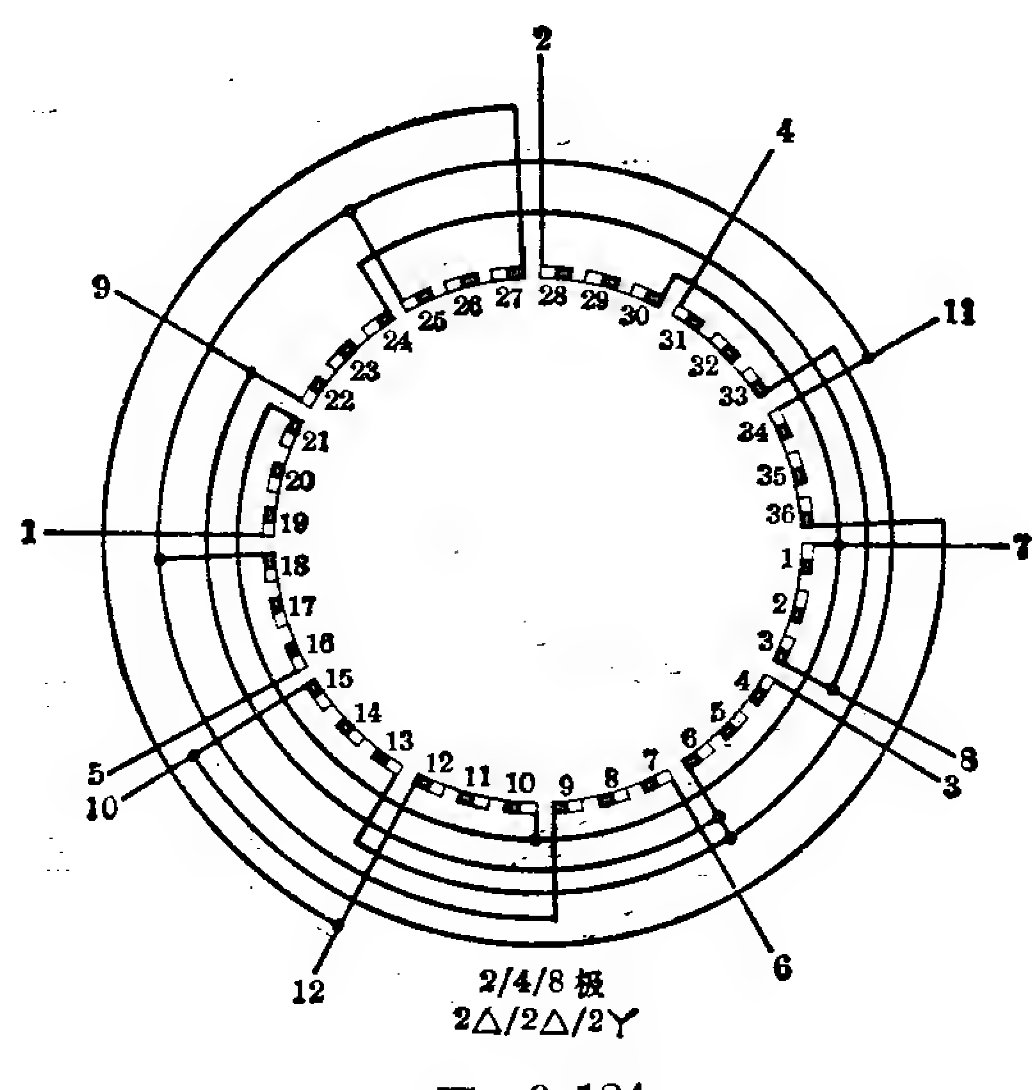
图　9-121

图　9-122



8 极

图 9-123



2/4/8 极
2△/2△/2Y

图 9-124

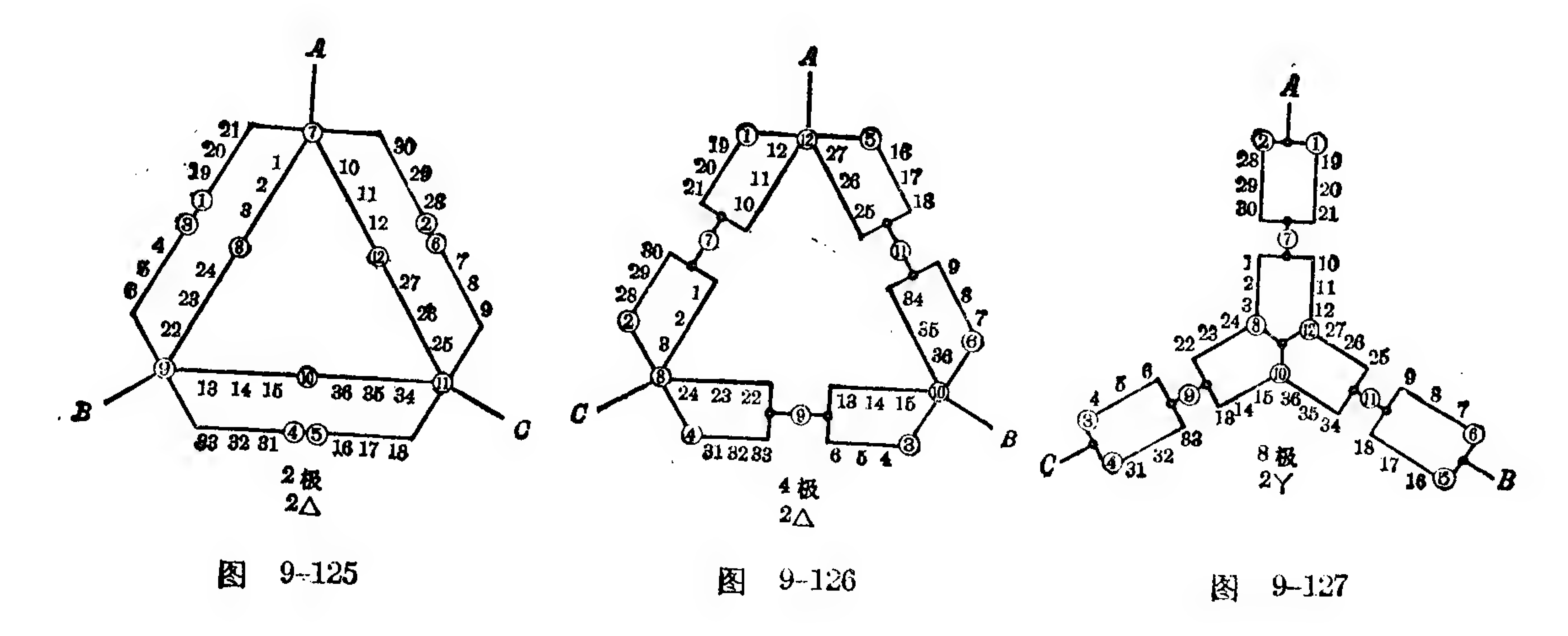


图 9-125

图 9-126

图 9-127

方案 24 2/4/8 极(定子 36 槽)之二

本方案采用两种不同跨距线圈的绕组(接线圆图中槽号带 * 者跨距 1-13, 不带 * 者跨距 1-7)。利用庶极接法在 60° 相带的两极绕组基础上获得 120° 相带的四极绕组, 八极则利用变跨距法获得。两、八极转向相同, 四极转向相反。附录一中单绕组 2/4/8 极三速电动机均采用此方案。

绕组系数: (跨距 1-7, 1-13)

两极——$K_d=0.956$ $K_y=0.707$ $K_{dy}=0.676$

四极——$K_d=0.83$ $K_y=1$ $K_{dy}=0.83$

八极——$K_d=0.731$ $K_y=0.866$ $K_{dy}=0.633$

联结方式:

2△/2△/2Y, 引出线 9 根。

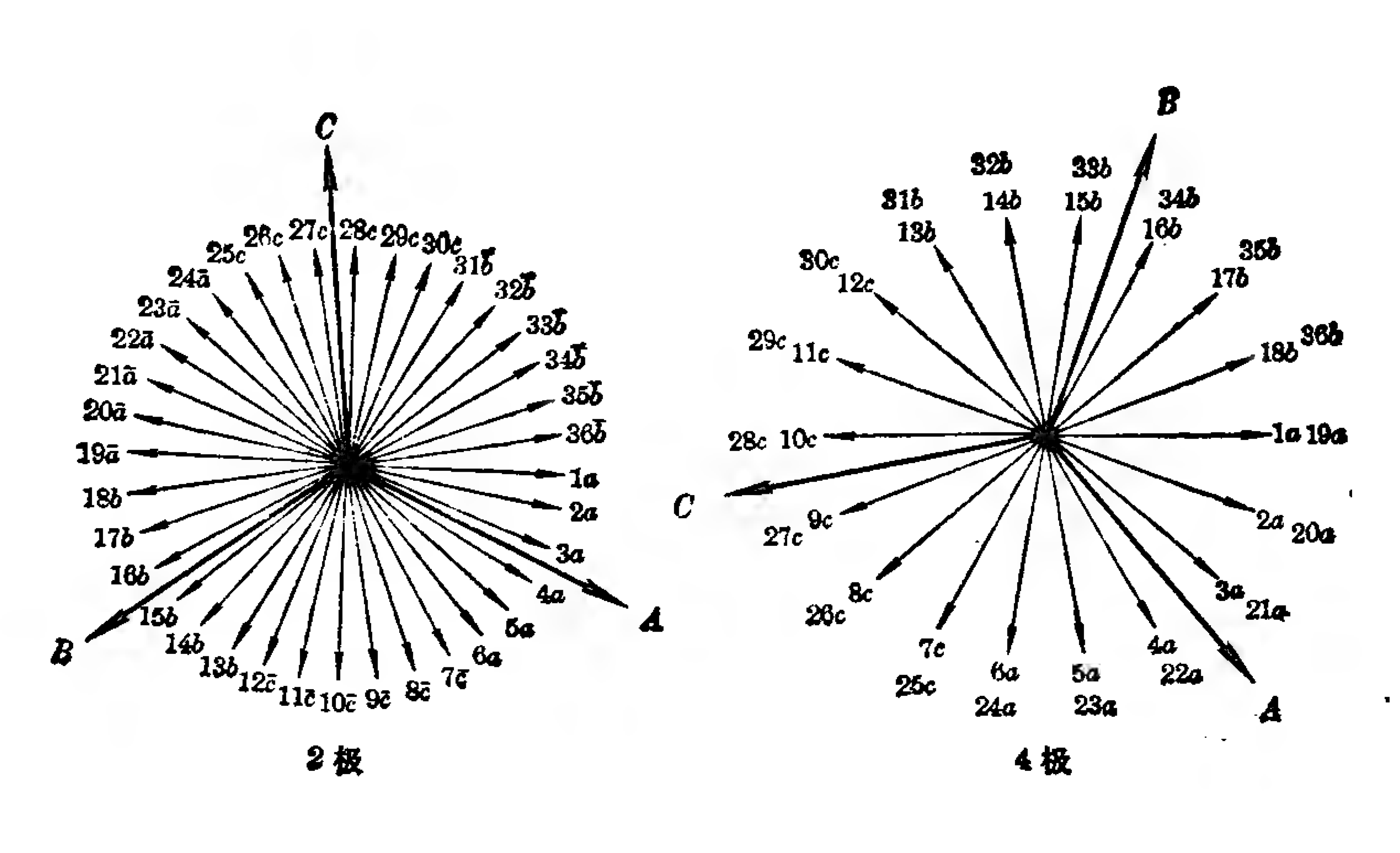


图 9-128　　图 9-129

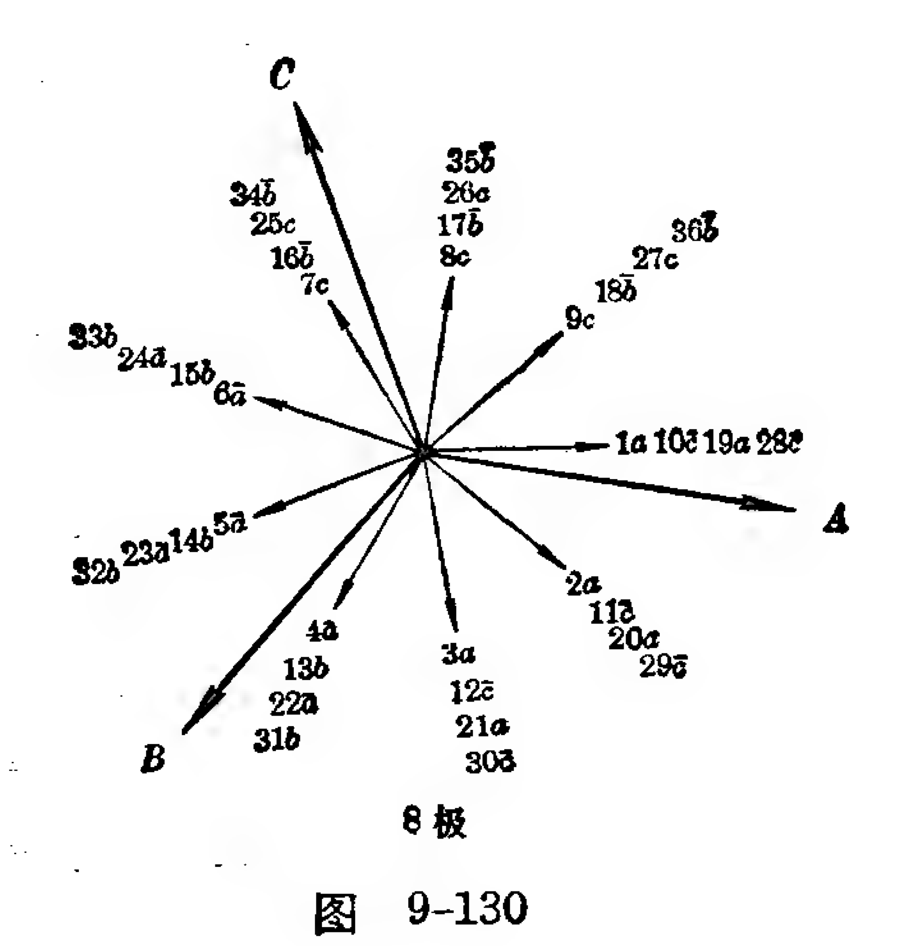


图 9-130

2/4/8 极

2△/2△/2Y

图 9-131

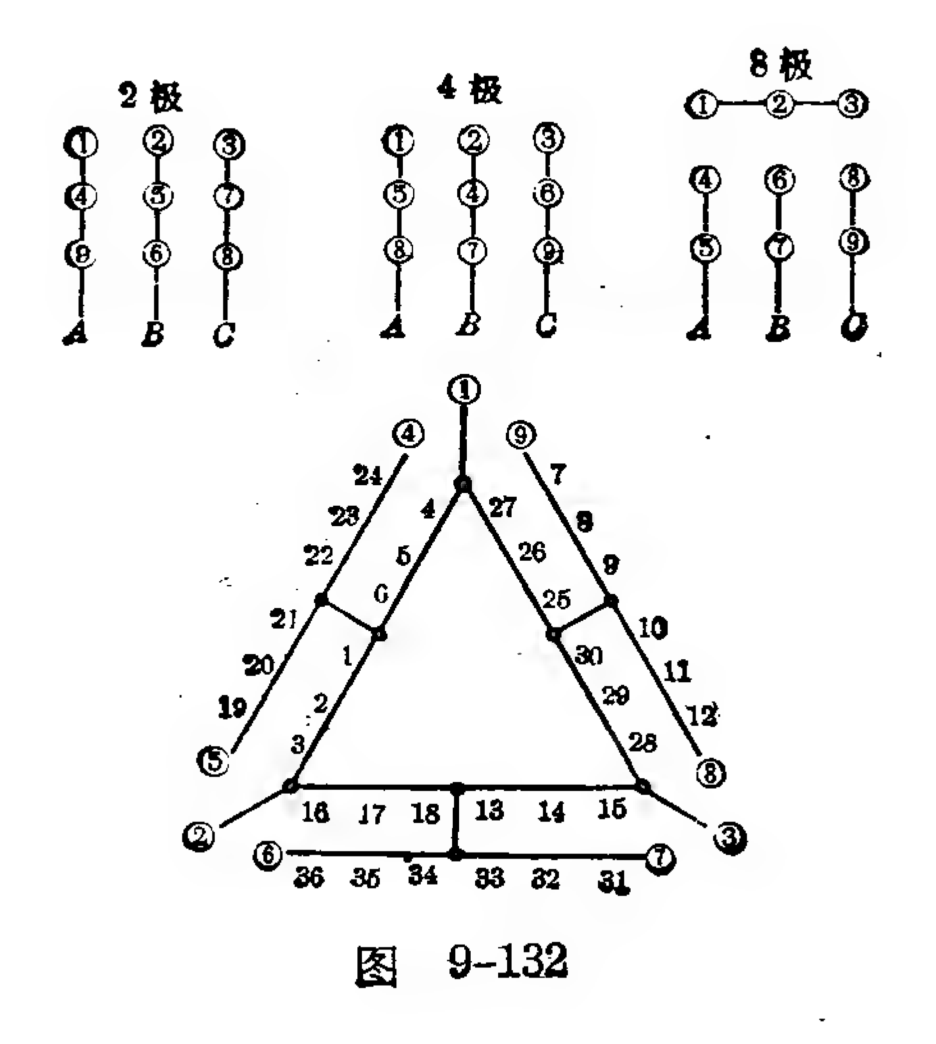


图 9-132

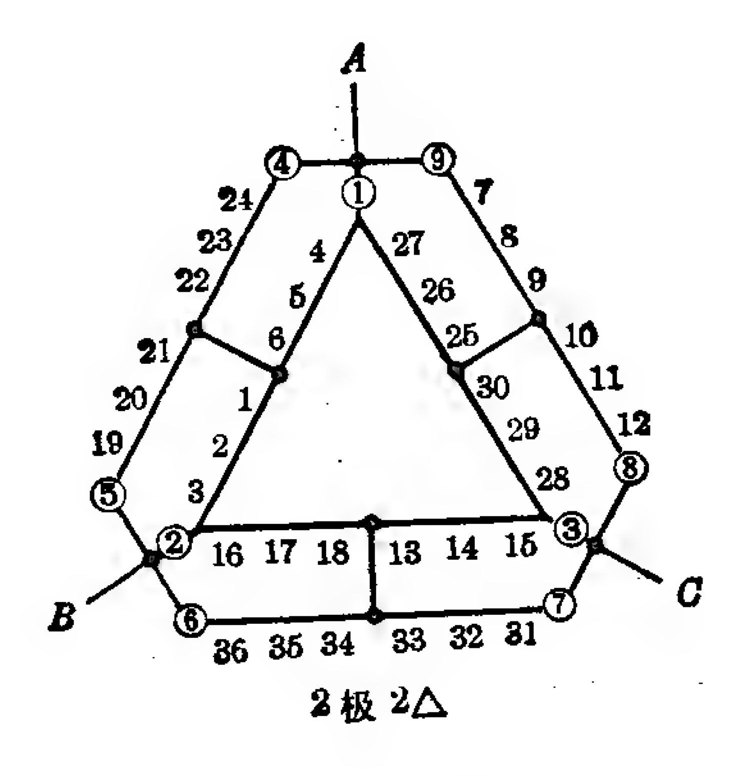


图 9-133

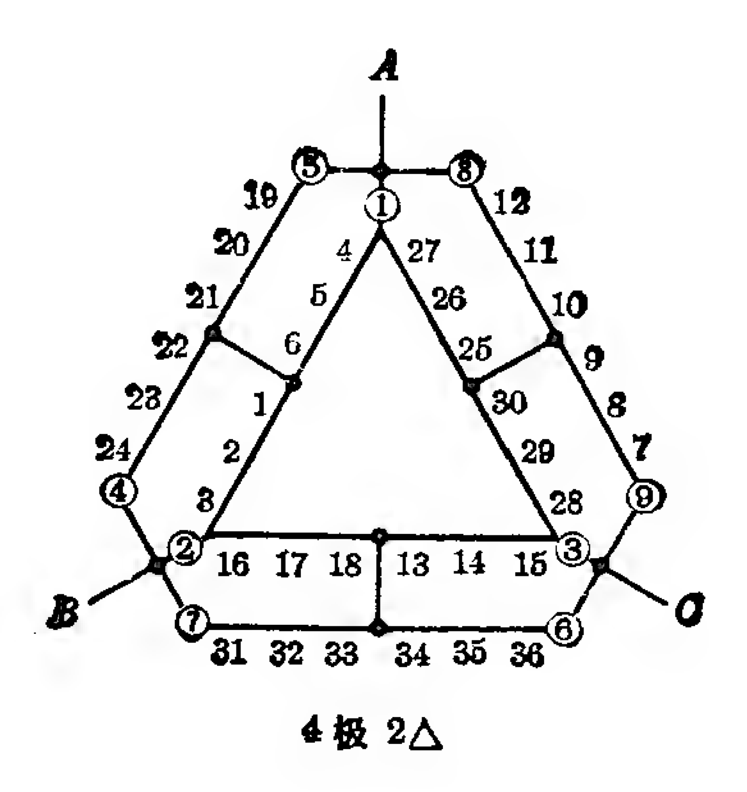


图 9-134

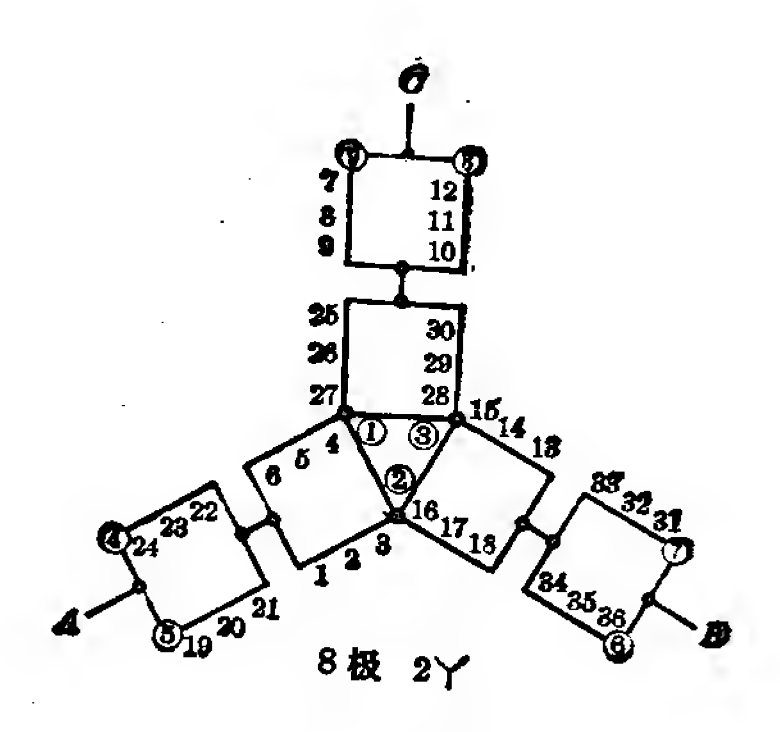


图 9-135

方案 25 2/4/8 极(定子 48 槽)

本方案采用两种不同跨距线圈的绕组(接线圆图中槽号带 * 者跨距 1-17, 不带 * 者跨距 1-9)。利用庶极接法在 60° 相带的两极绕组基础上获得 120° 相带的四极绕组,八极则利用变跨距法获得。两、八极转向相同,四极转向相反。

本方案未经试制。

绕组系数:(跨距 1-17, 1-9)

两极——$K_d=0.956$ $K_y=0.707$ $K_{dy}=0.676$

四极——$K_d=0.83$ $K_y=1$ $K_{dy}=0.83$

八极——$K_d=0.724$ $K_y=0.866$ $K_{dy}=0.63$

联结方式:

2△/2△/2Y, 引出线 9 根。

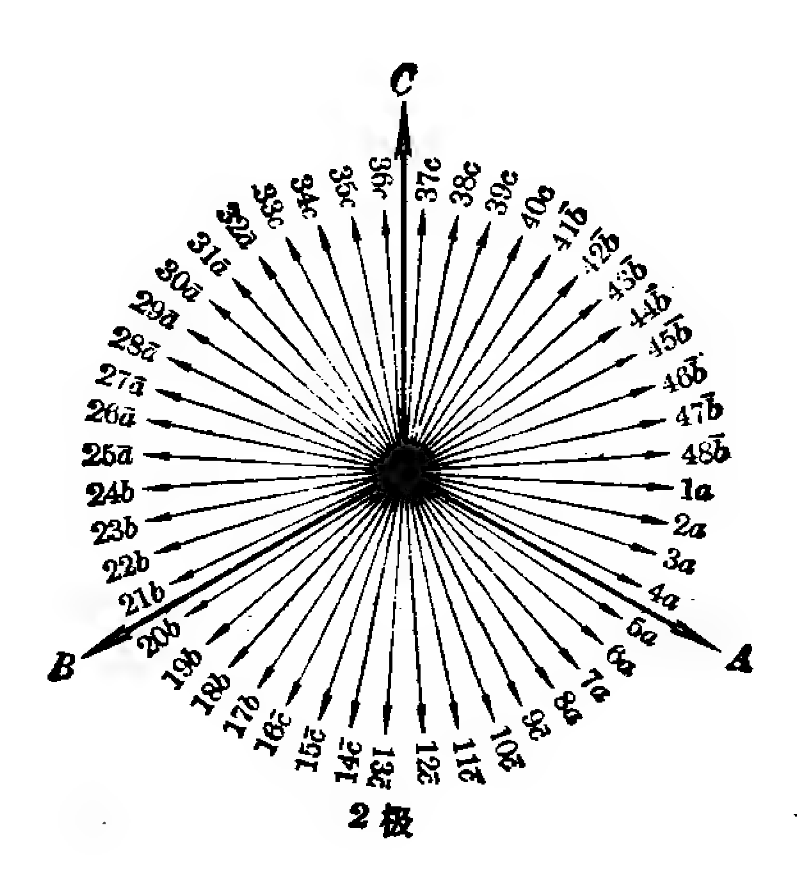

C
A
B
2 极

图 9-136

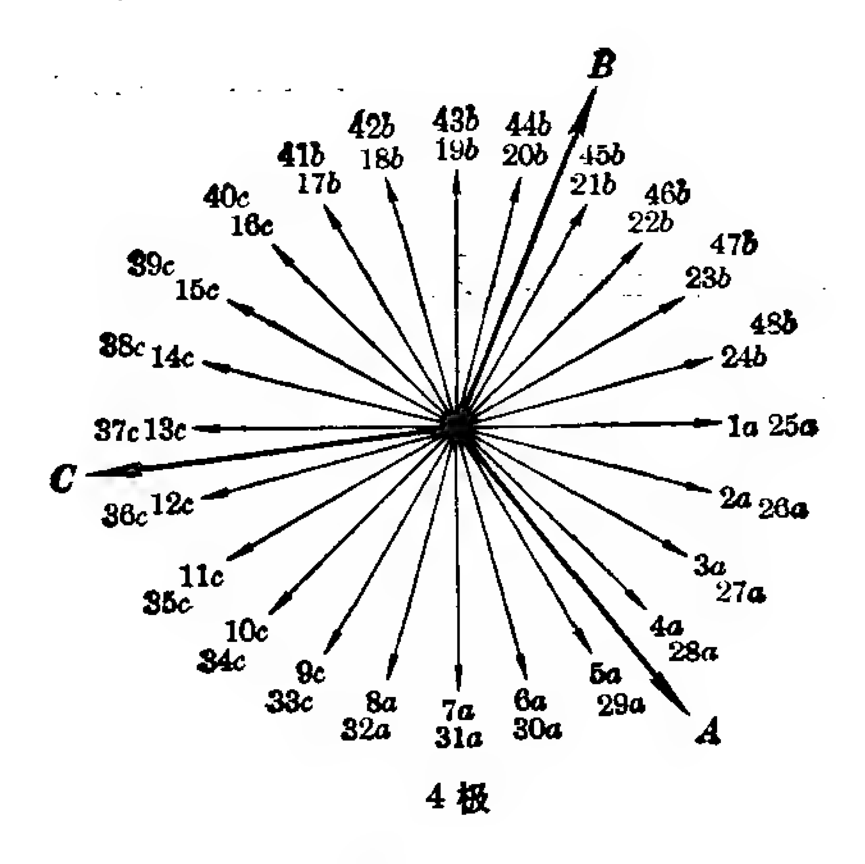

B
A
C
1a 25a
2a 26a
3a 27a
4a 28a
5a 29a
6a 30a
7a 31a
8a 32a
9c 33c
10c 34c
11c 35c
12c 36c
37c 13c
38c 14c
39c 15c
40c 16c
41b 17b
42b 18b
43b 19b
44b 20b
45b 21b
46b 22b
47b 23b
48b 24b
4 极

图 9-137

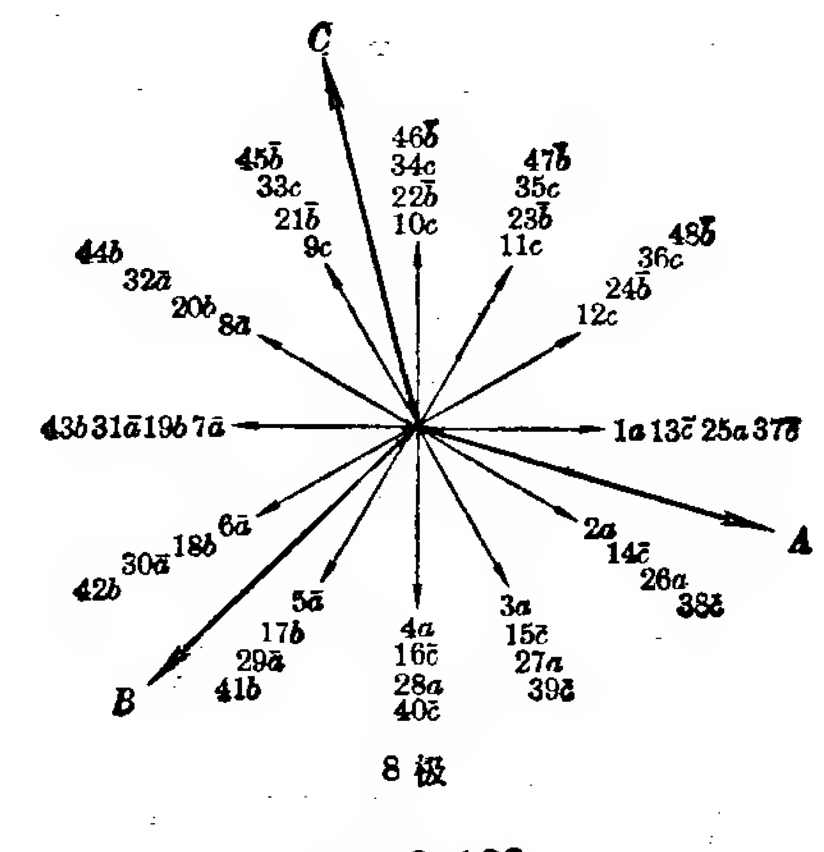


图 9-138

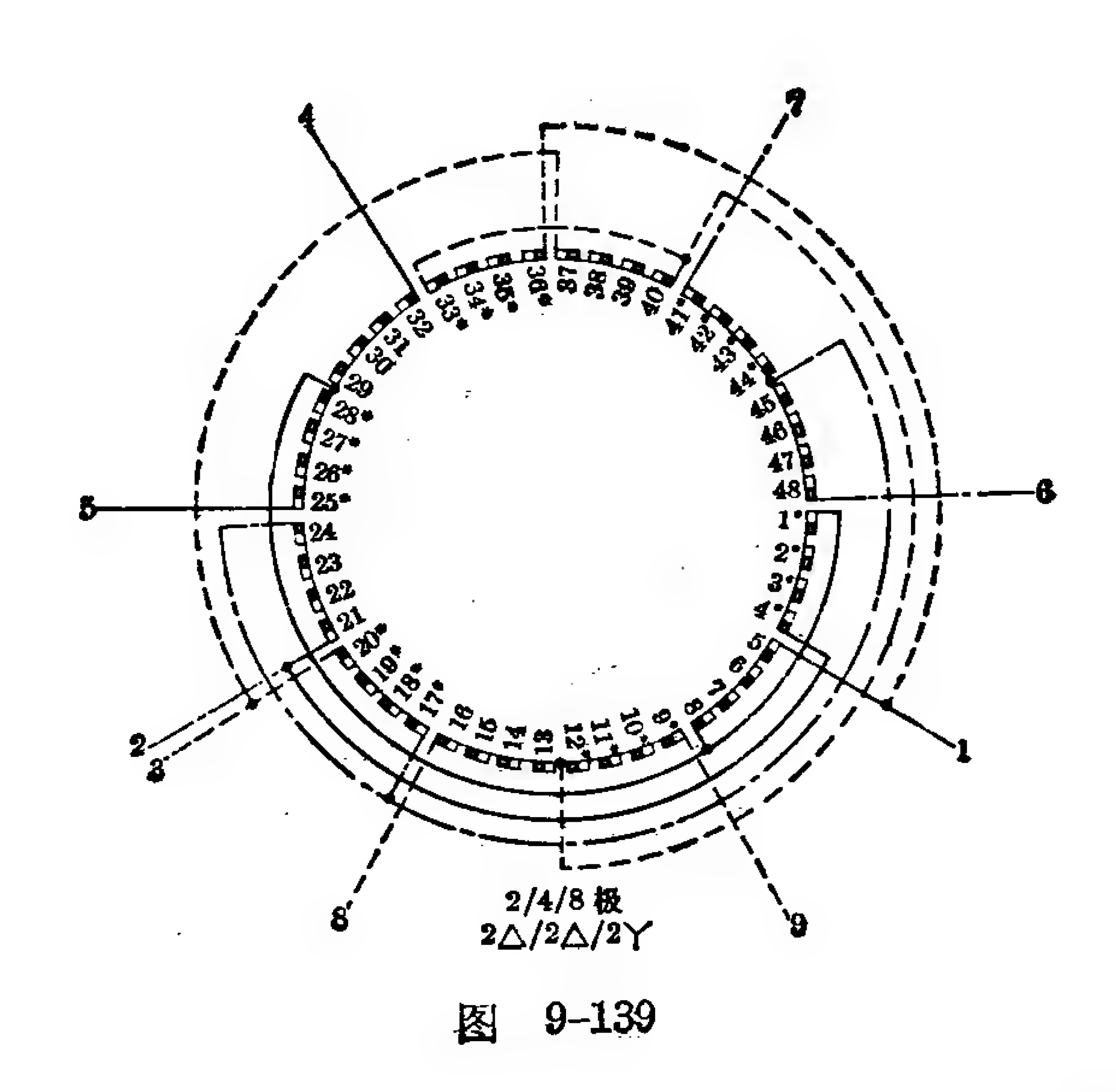


图 9-139

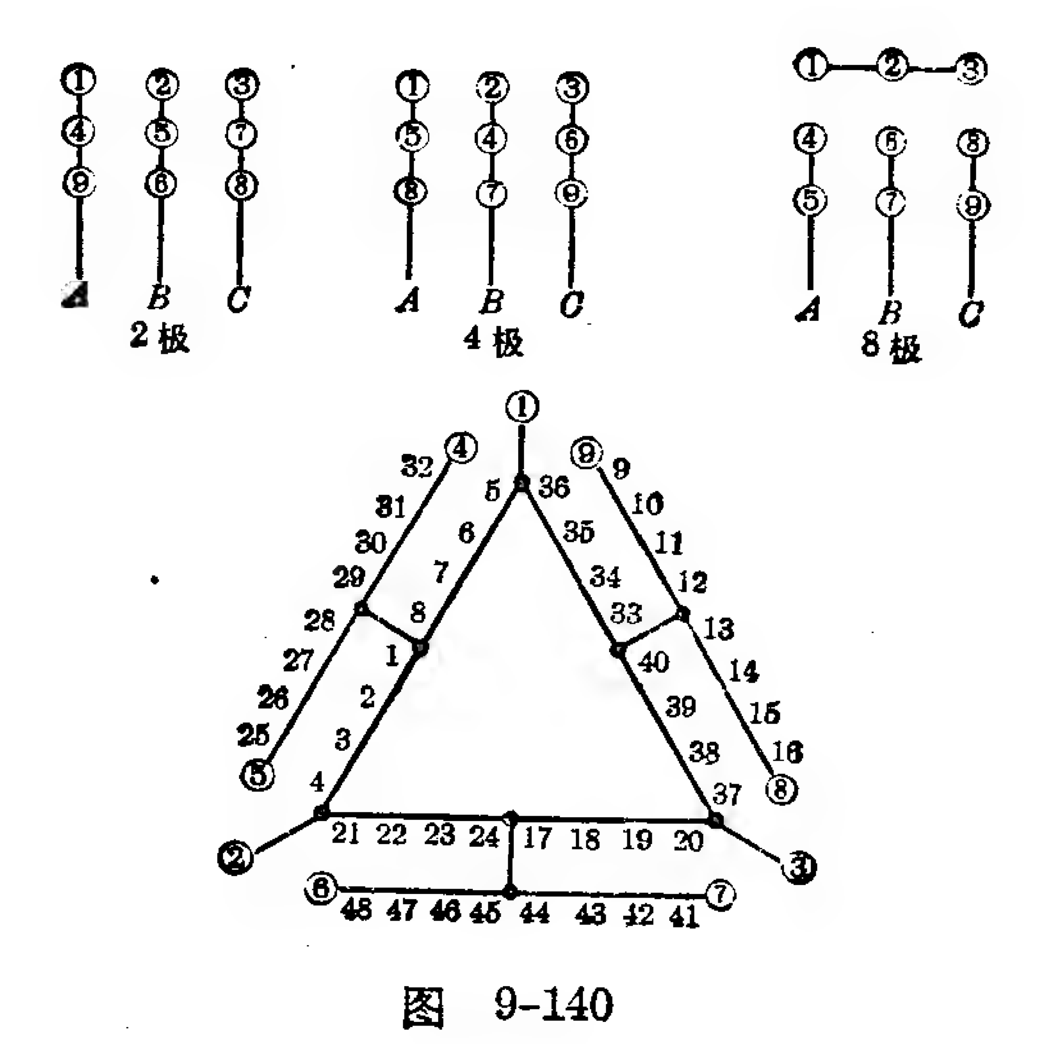


图 9-140

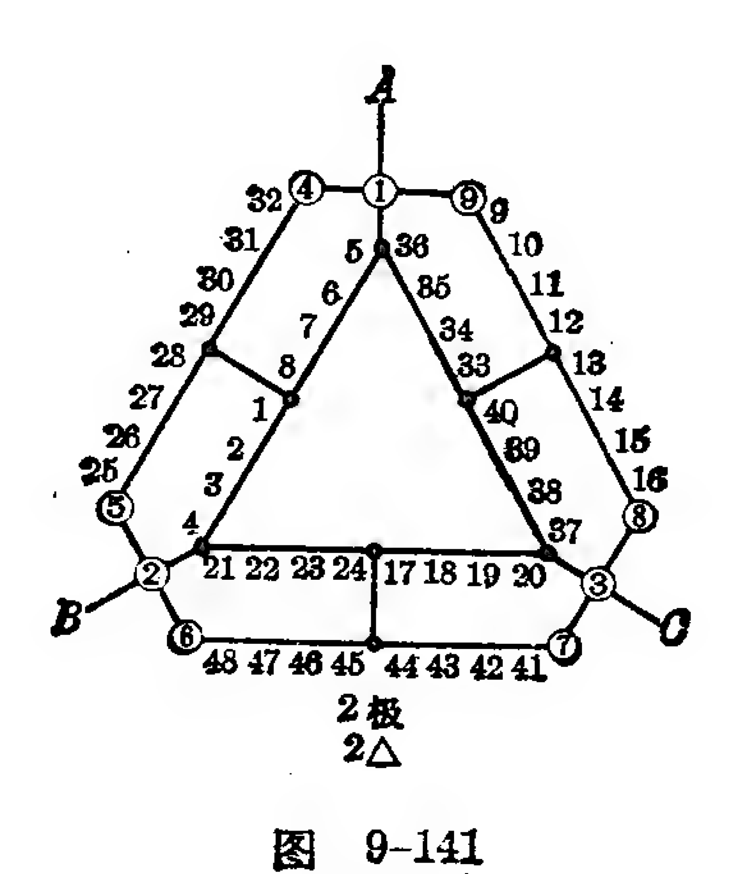


图 9-141

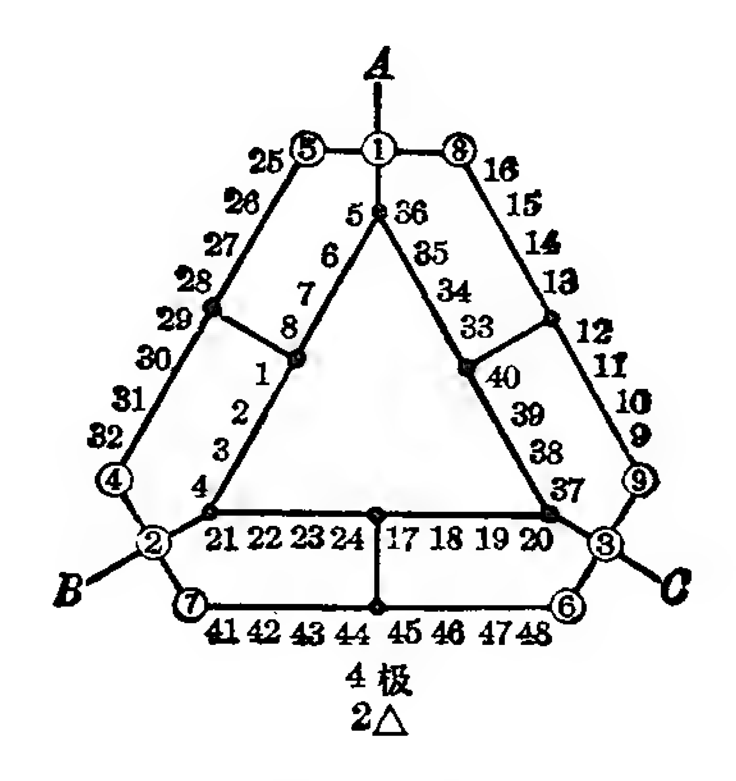


图 9-142

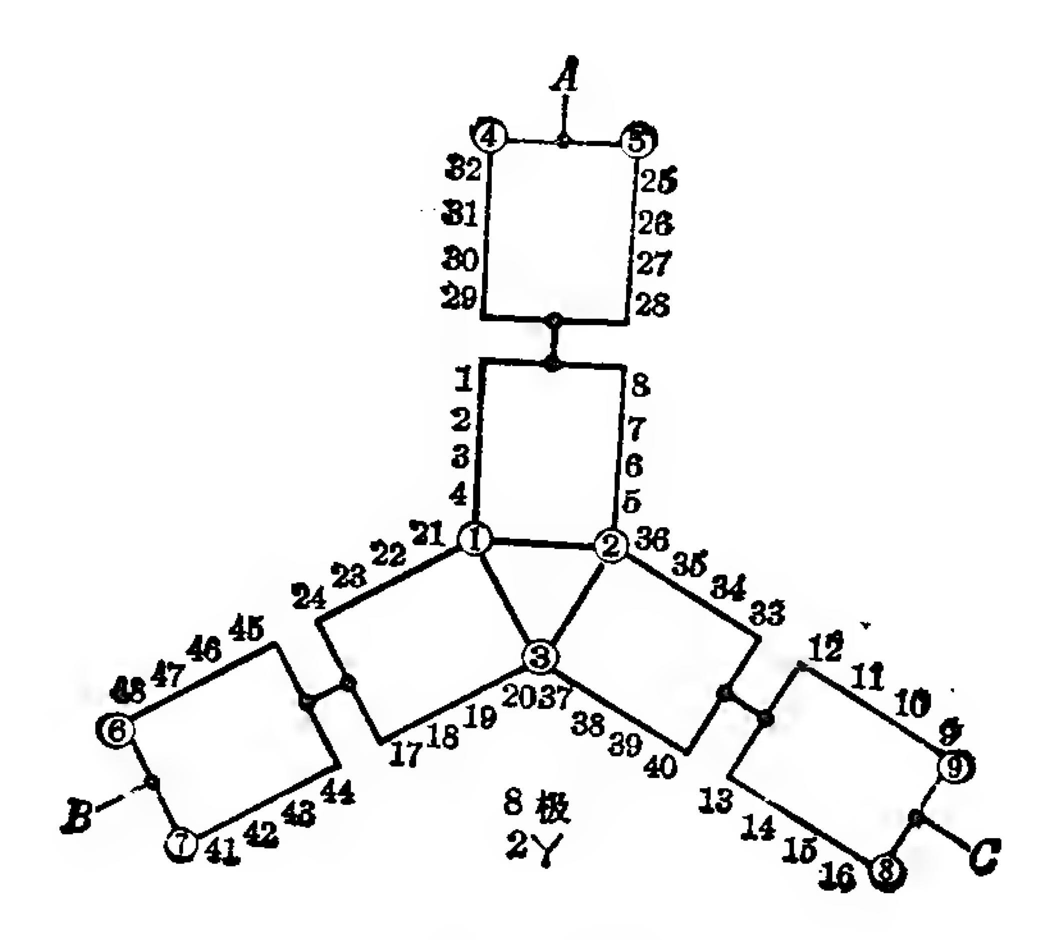


图 9-143

方案 26　4/6/8 极(定子 36 槽)

本方案四极为正规 60° 相带绕组，反向得六极，八极则利用庶极接法获得。四、六极转向相同，八极转向相反。附录一中单绕组 4/6/8 极三速电动机均采用此方案。

绕组系数：(跨距 1-6)

四极——$K_d=0.96$　$K_y=0.766$　$K_{dy}=0.735$

六极——$K_d=0.644$　$K_y=0.966$　$K_{dy}=0.622$

八极——$K_d=0.844$　$K_y=0.985$　$K_{dy}=0.831$

联结方式：

2Y/2Y/2Y，引出线 9 根。

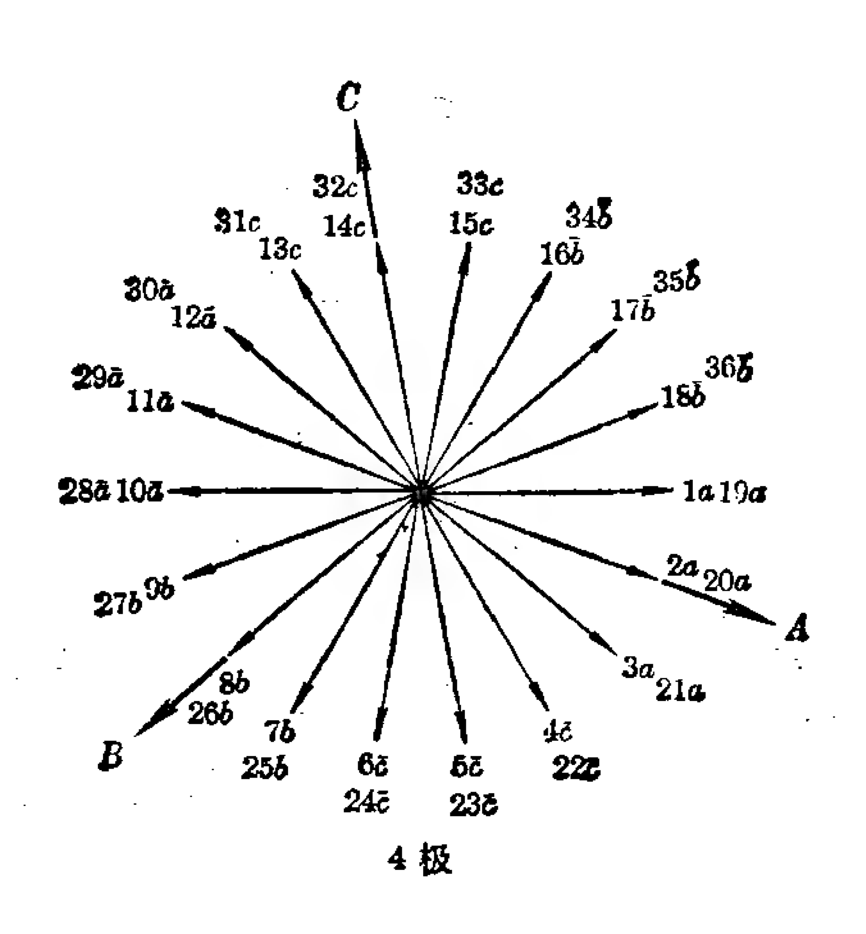


图　9-144

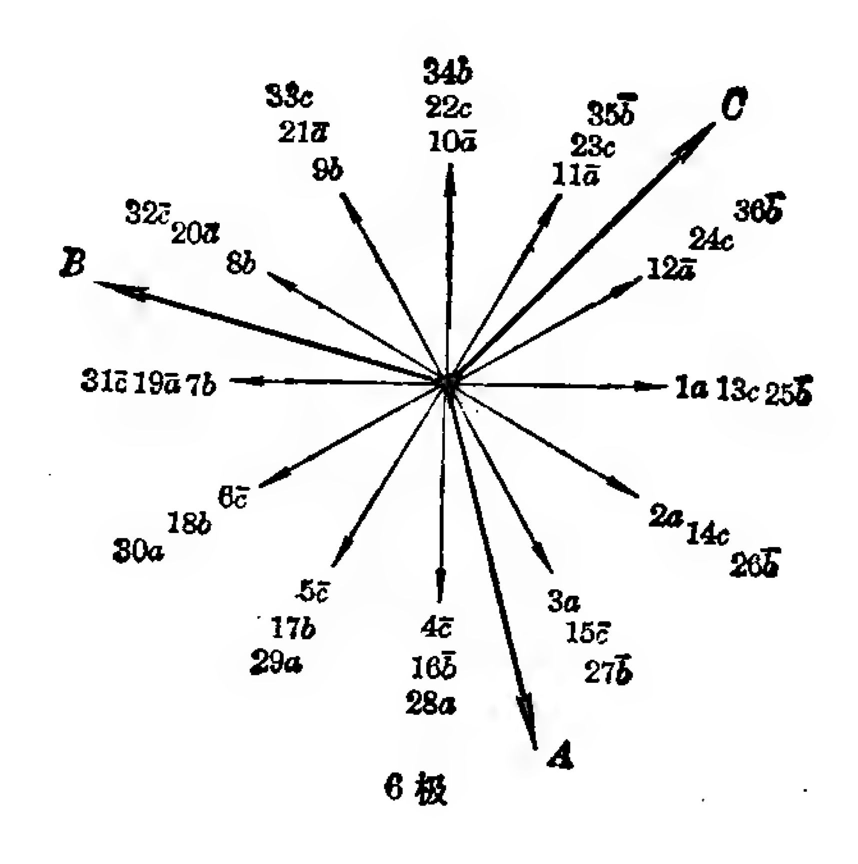


图 9-145

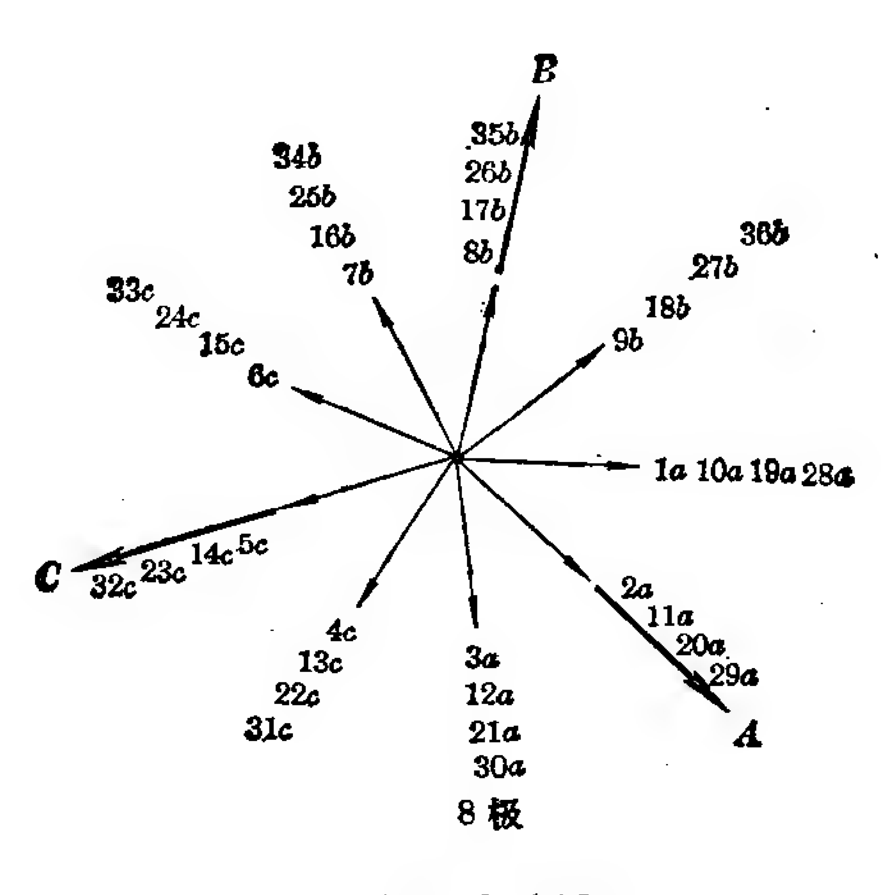


图 9-146

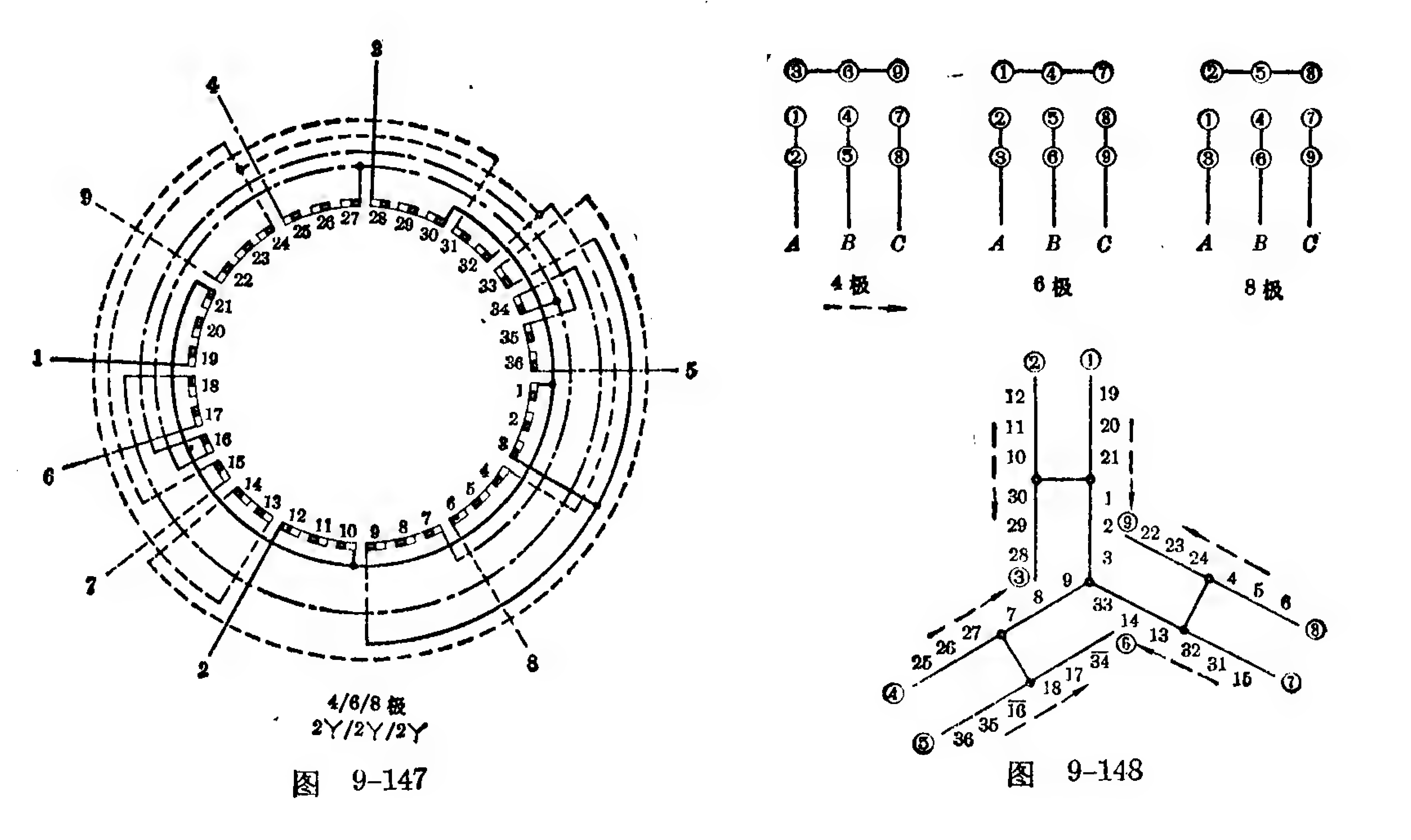


图 9-147

图 9-148

方案 27　4/6/8 极(定子 72 槽)

本方案四极也为 60° 相带绕组，反向得六极，八极利用庶极接法获得。4 极转向与六、八极相反。

绕组系数：(跨距 1-13)

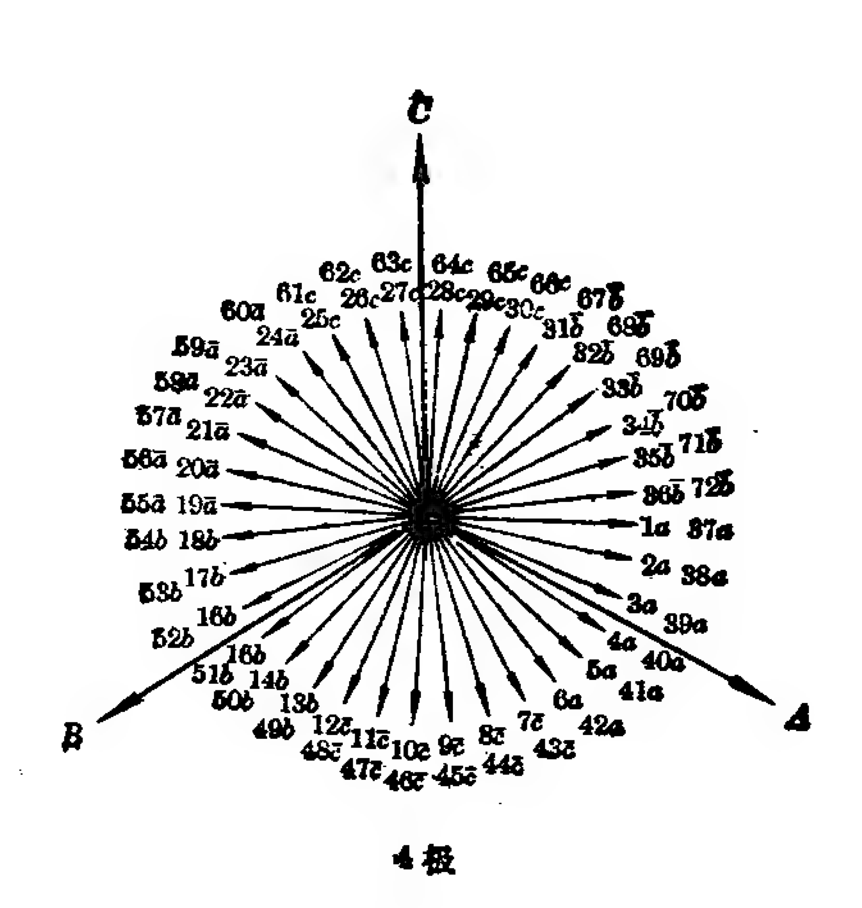
四极——$K_d=0.956$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.823$

六极——$K_d=0.636$　$K_y=1$　$K_{dy}=0.636$

八极——$K_d=0.831$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.72$

联结方式：

2△/2△/2Y，引出线 9 根。



4 极

图　9-149

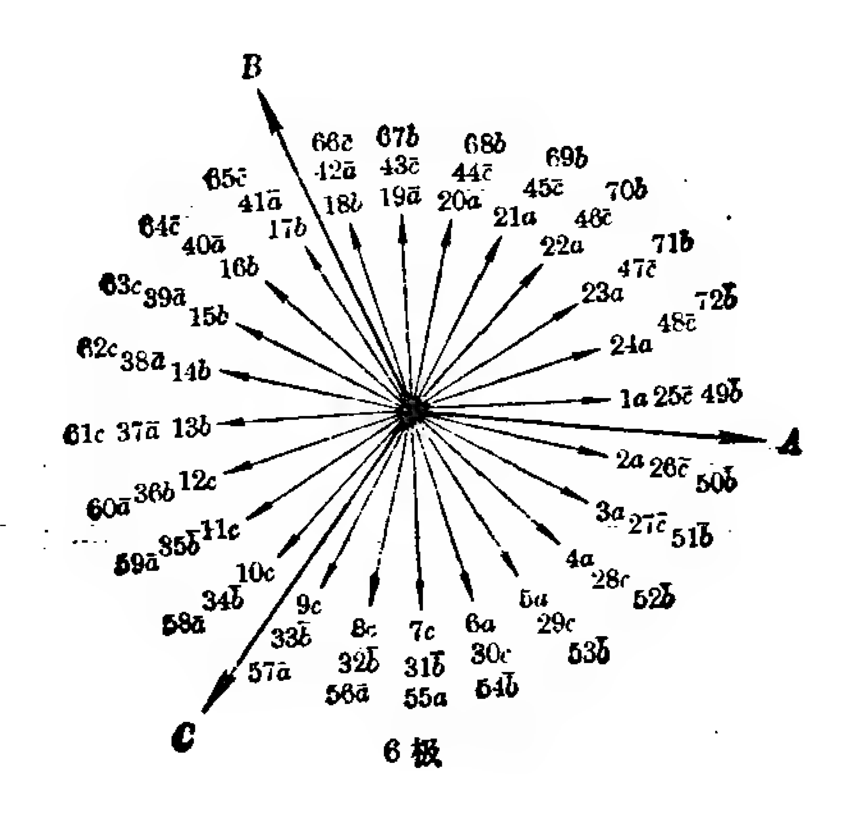


图 9-150

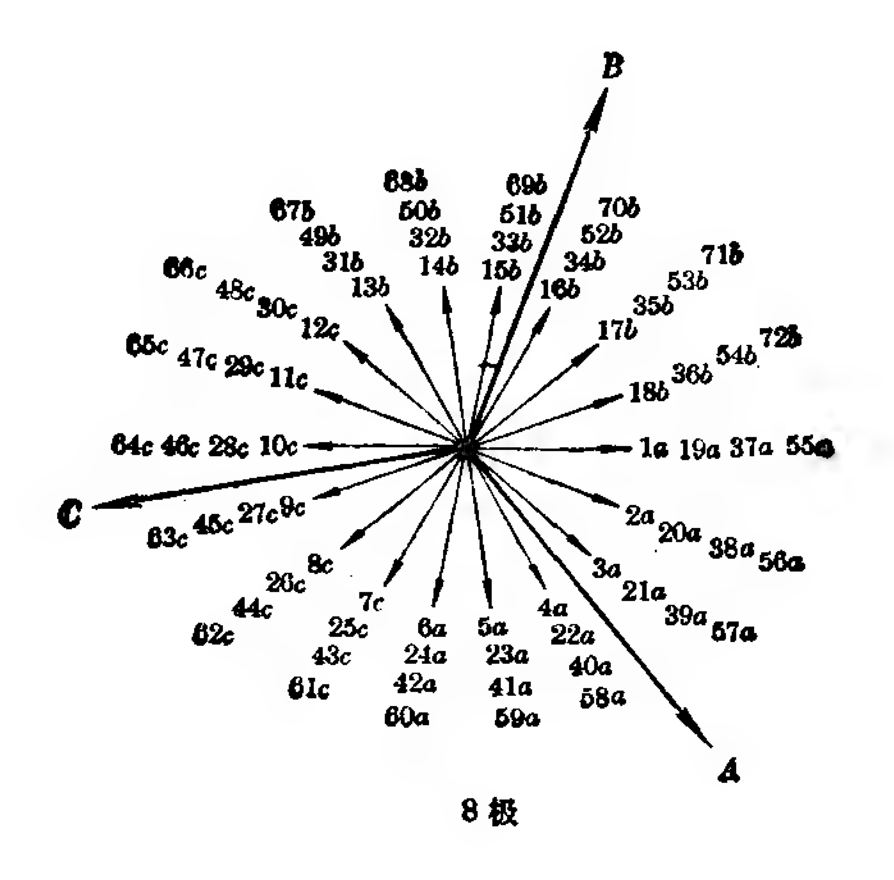


图 9-151

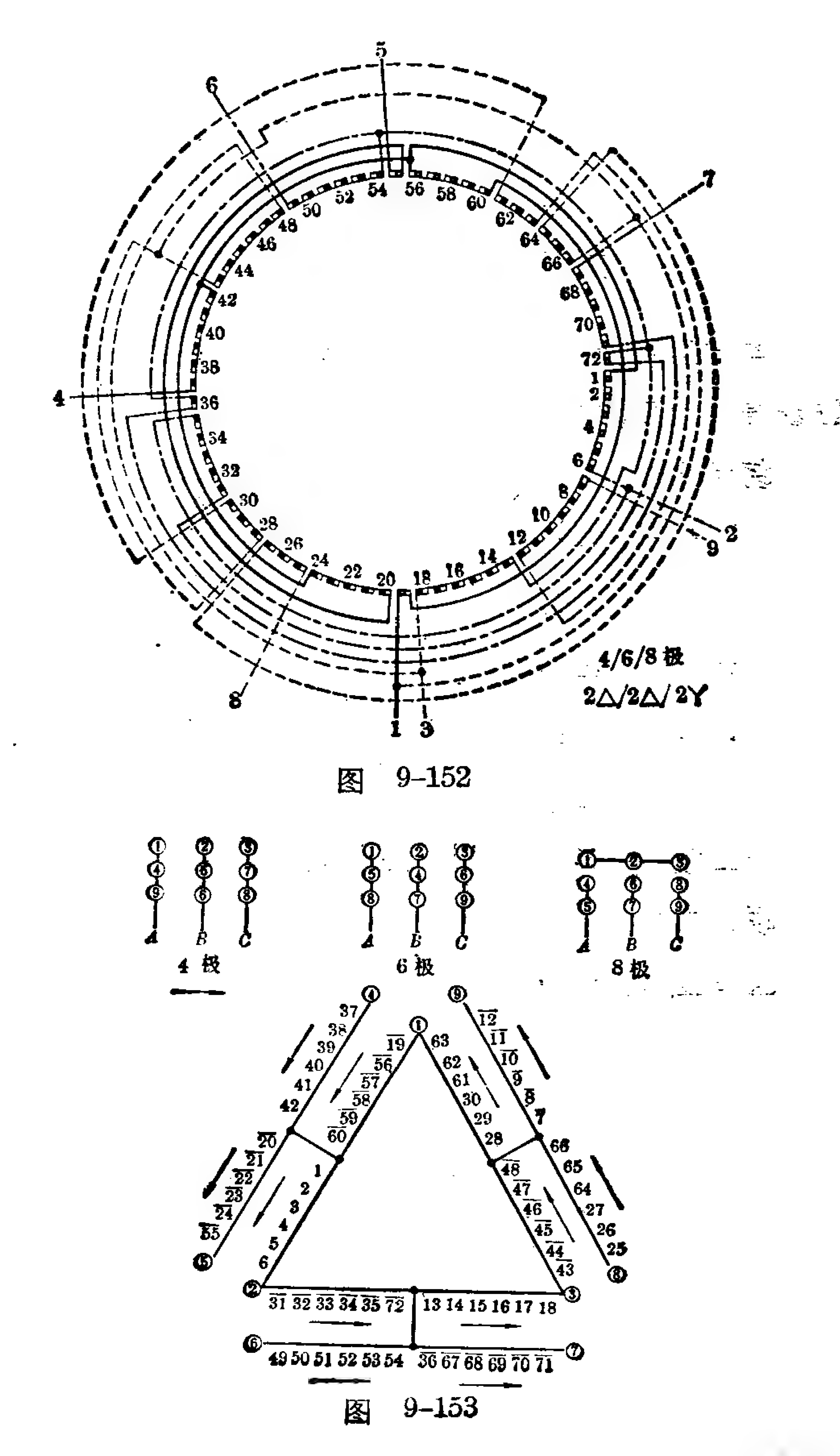


图 9-152

图 9-153

方案28 4/6/8/12极(定子36槽)

本方案四、六、八极采用换相法变极，十二极采用庶极接法获得。六极转向与四、八、十二极相反。

绕组系数：(跨距1-4)

四极——$K_{dY}=0.985$ $K_y=0.5$ $K_{dyY}=0.493$

$K_{d\triangle}=0.97$ $K_{dy\triangle}=0.485$

六极——$K_d=0.966$ $K_y=0.707$ $K_{dy}=0.683$

八极——$K_{dY}=0.94$ $K_y=0.866$ $K_{dyY}=0.814$

$K_{d\triangle}=0.925$ $K_{dy\triangle}=0.80$

十二极——$K_d=0.866$ $K_y=1$ $K_{dy}=0.866$

联结方式：

△/2△/△/3Y，引出线25根。

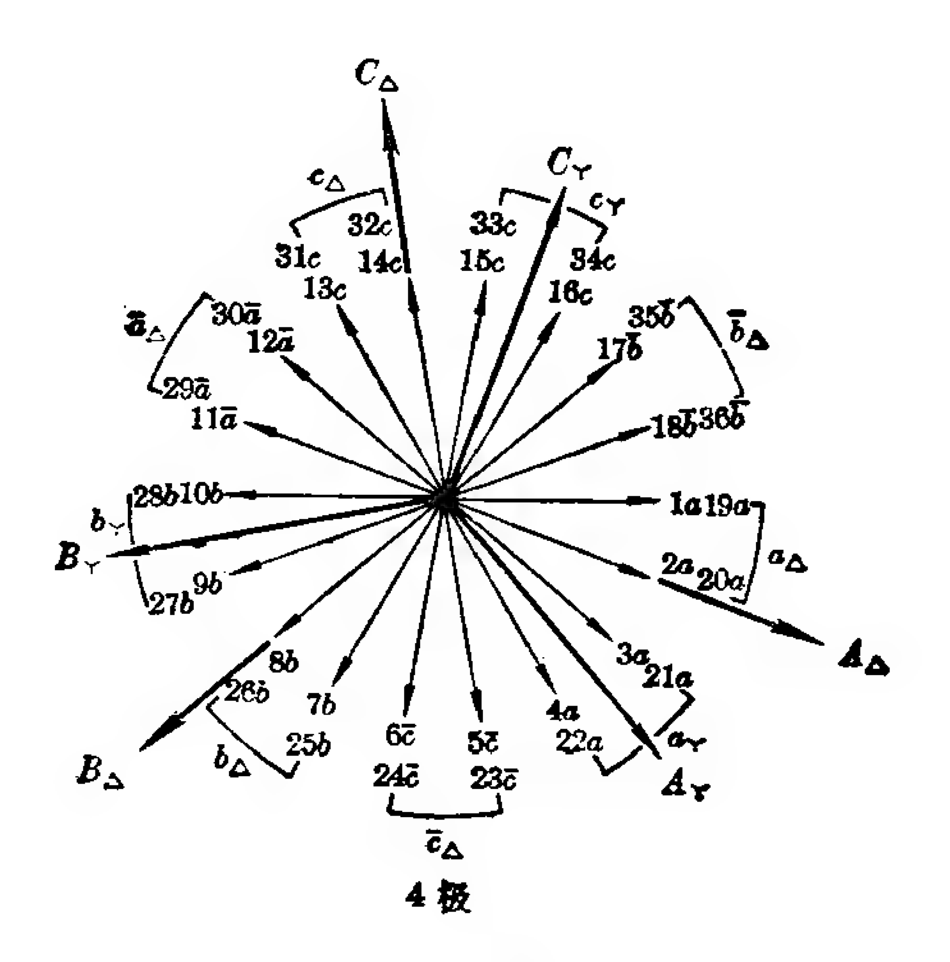


图 9-154

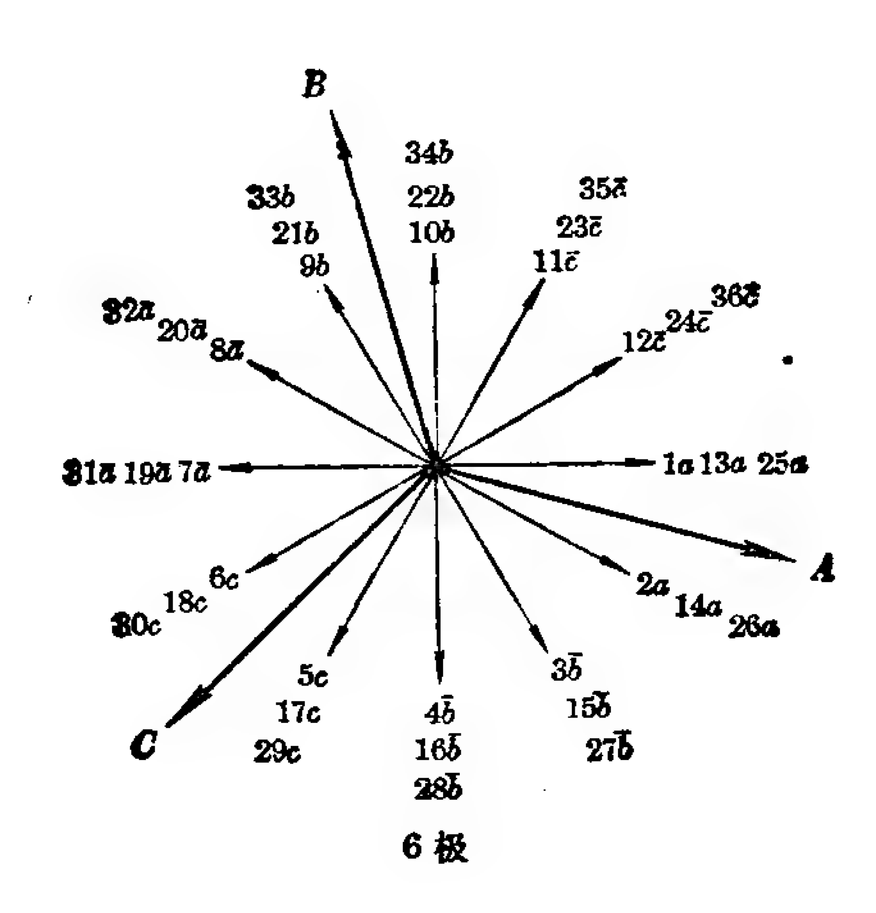
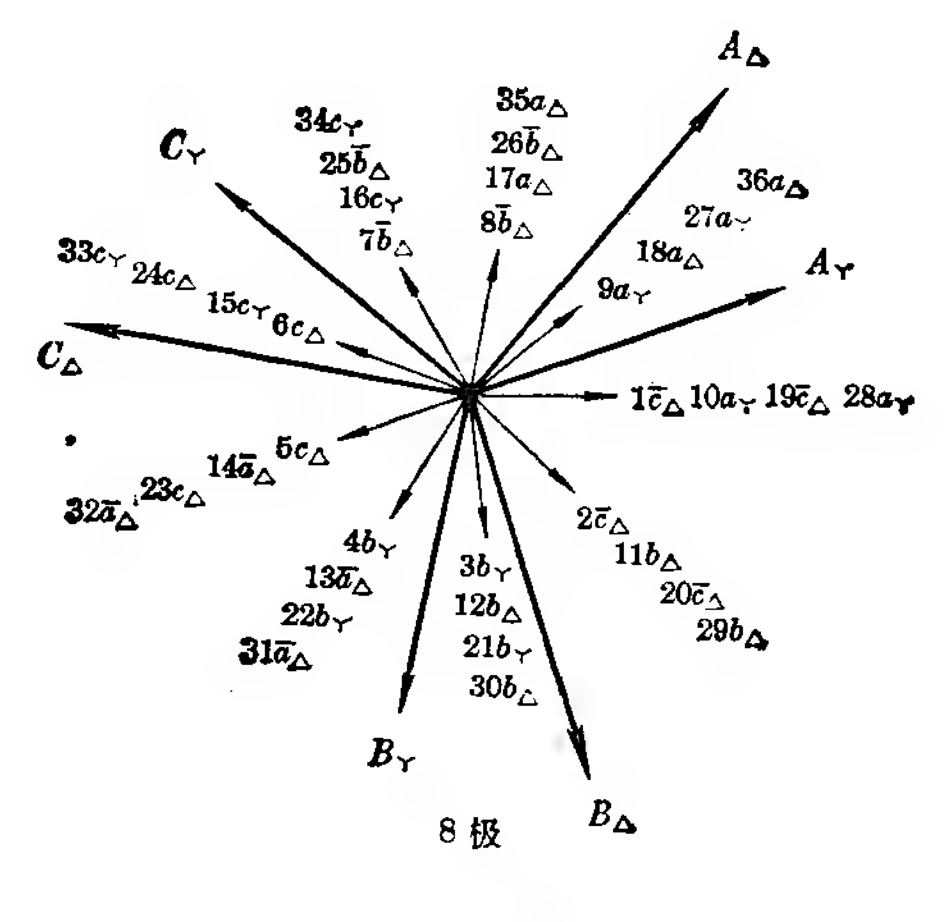


图 9-155


$A_{\triangle}$
A_{Y}
B_{Y}
$B_{\triangle}$
C_{Y}
$C_{\triangle}$
$35a_{\triangle}$ $26\bar{b}_{\triangle}$ $17a_{\triangle}$ $8\bar{b}_{\triangle}$
$34c_{Y}$ $25\bar{b}_{\triangle}$ $16c_{Y}$ $7\bar{b}_{\triangle}$
$36a_{\triangle}$ $27a_{Y}$ $18a_{\triangle}$ $9a_{Y}$
$33c_{Y}$ $24c_{\triangle}$ $15c_{Y}$ $6c_{\triangle}$
$1\bar{c}_{\triangle}$ $10a_{Y}$ $19\bar{c}_{\triangle}$ $28a_{Y}$
$5c_{\triangle}$ $14\bar{a}_{\triangle}$ $23c_{\triangle}$ $32\bar{a}_{\triangle}$
$4b_{Y}$ $13\bar{a}_{\triangle}$ $22b_{Y}$ $31\bar{a}_{\triangle}$
$3b_{Y}$ $12b_{\triangle}$ $21b_{Y}$ $30b_{\triangle}$
$2\bar{c}_{\triangle}$ $11b_{\triangle}$ $20\bar{c}_{\triangle}$ $29b_{\triangle}$
8 极

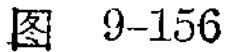


图 9-156

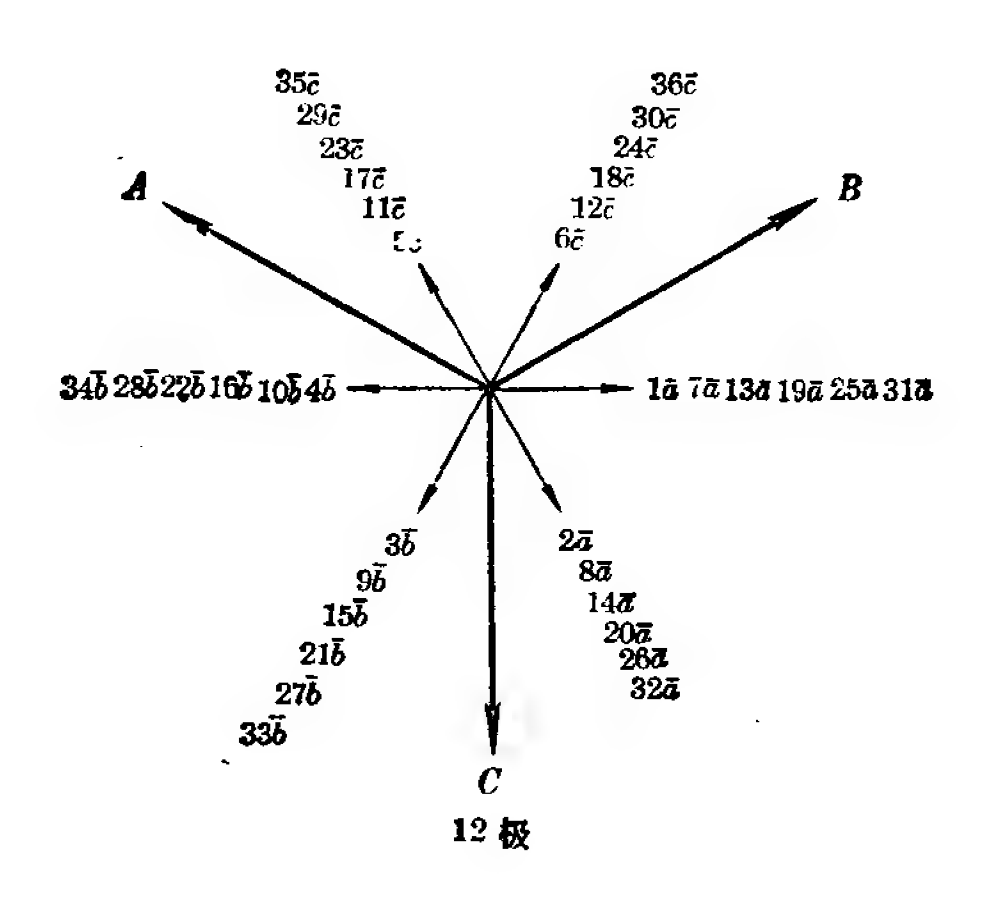

A
B
C
$35\bar{c}$ $29\bar{c}$ $23\bar{c}$ $17\bar{c}$ $11\bar{c}$
$36\bar{c}$ $30\bar{c}$ $24\bar{c}$ $18\bar{c}$ $12\bar{c}$ $6\bar{c}$
$34\bar{b}$ $28\bar{b}$ $22\bar{b}$ $16\bar{b}$ $10\bar{b}$ $4\bar{b}$
$1\bar{a}$ $7\bar{a}$ $13\bar{a}$ $19\bar{a}$ $25\bar{a}$ $31\bar{a}$
$3\bar{b}$ $9\bar{b}$ $15\bar{b}$ $21\bar{b}$ $27\bar{b}$ $33\bar{b}$
$2\bar{a}$ $8\bar{a}$ $14\bar{a}$ $20\bar{a}$ $26\bar{a}$ $32\bar{a}$
12 极

图 9-157

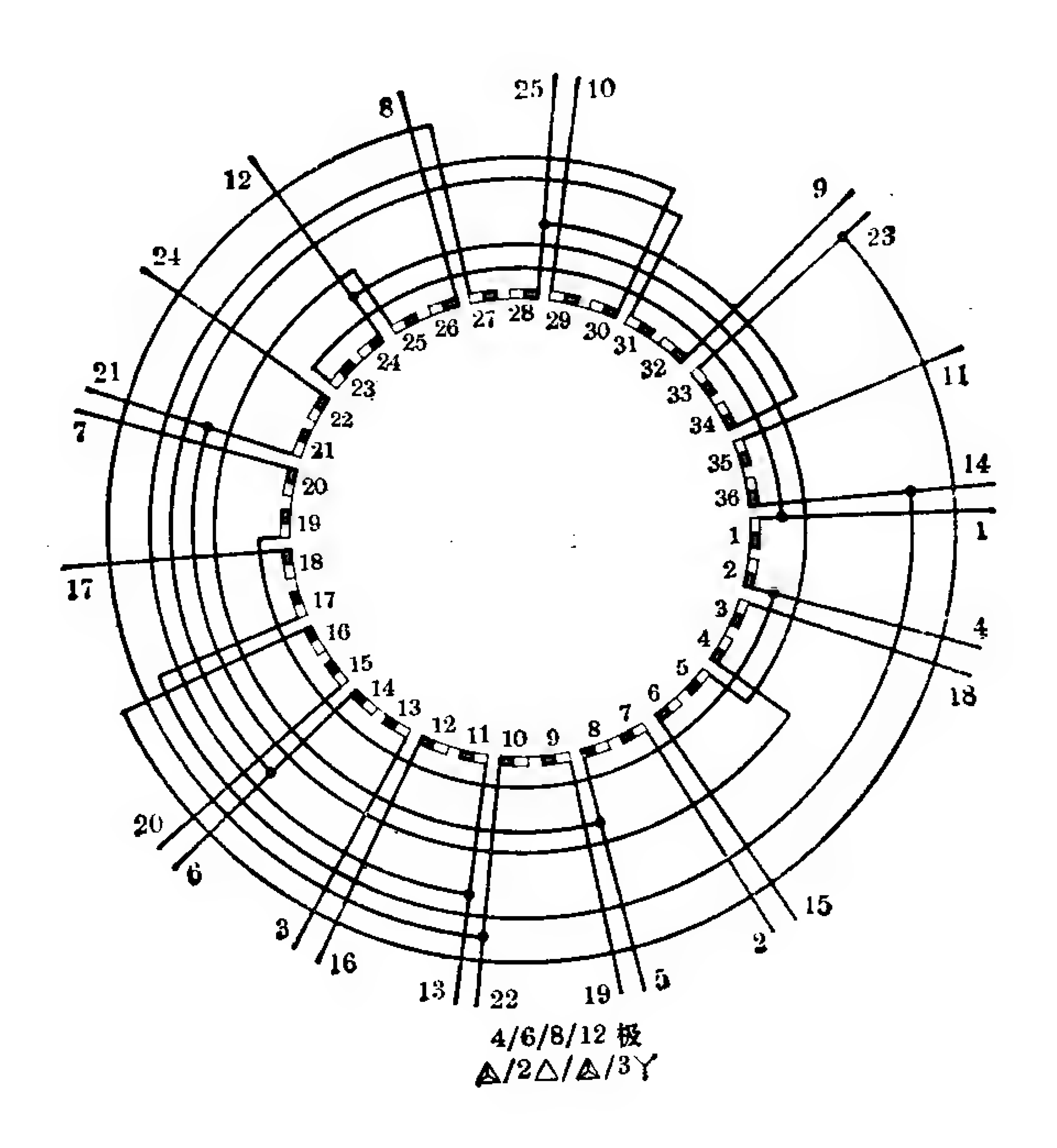


图 9-158

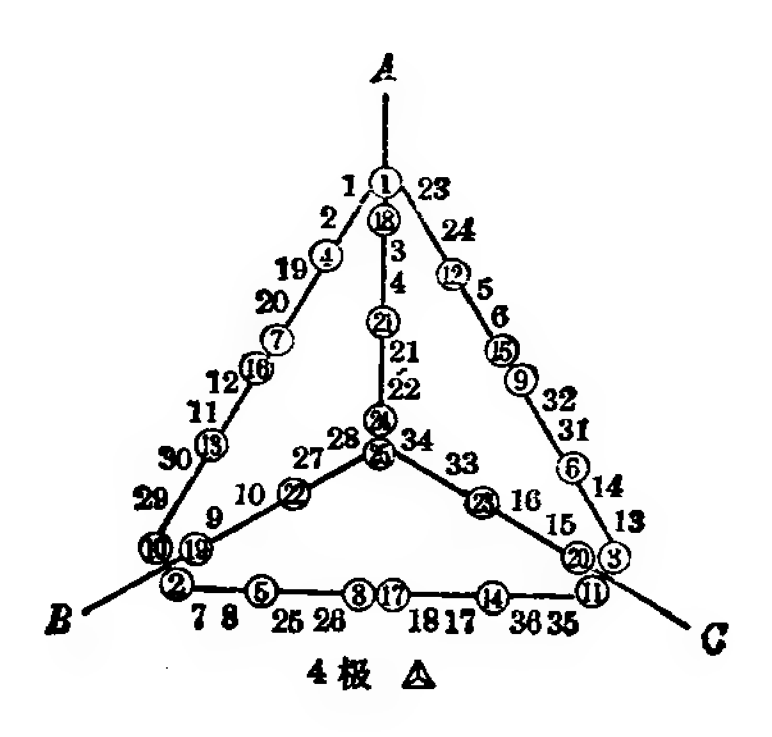


图 9-159

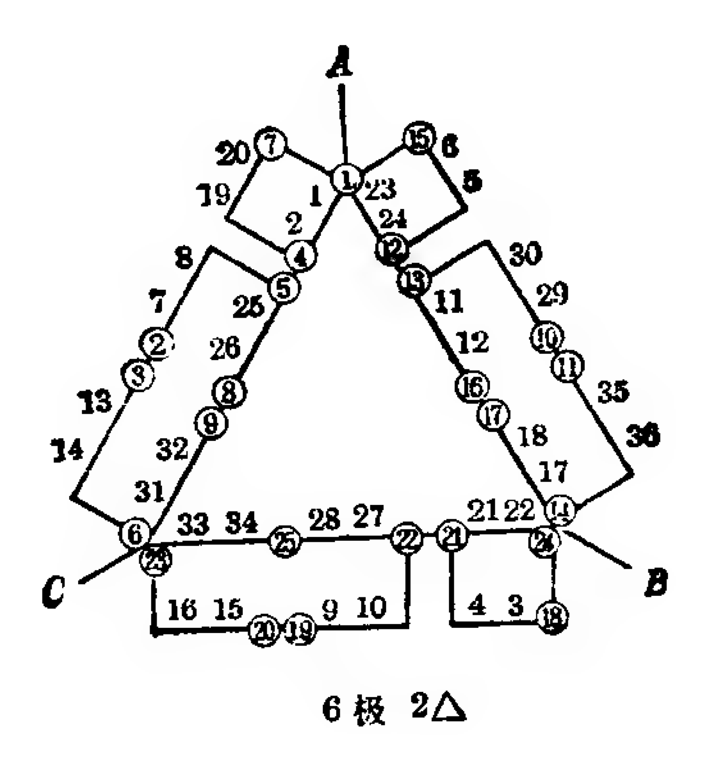


图 9-160

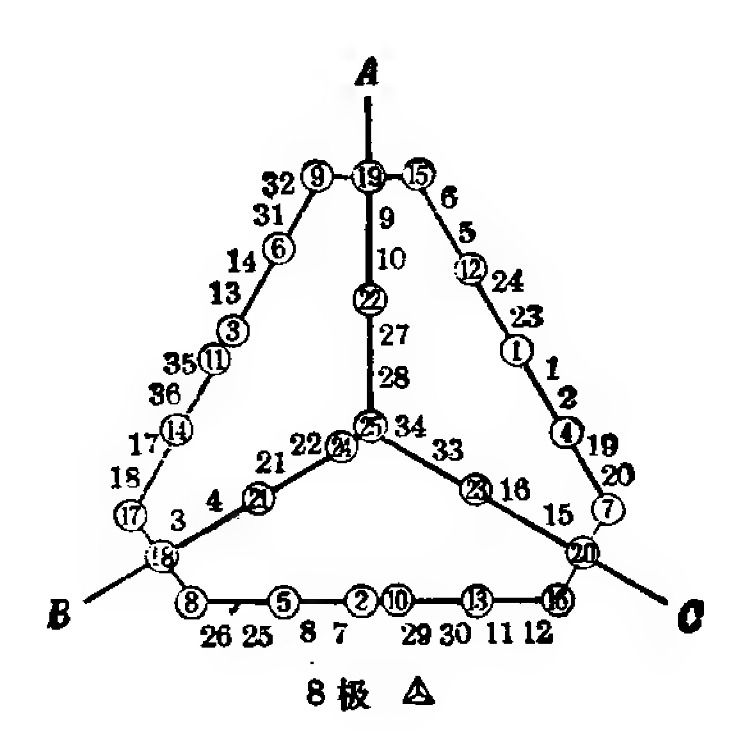


图 9-161

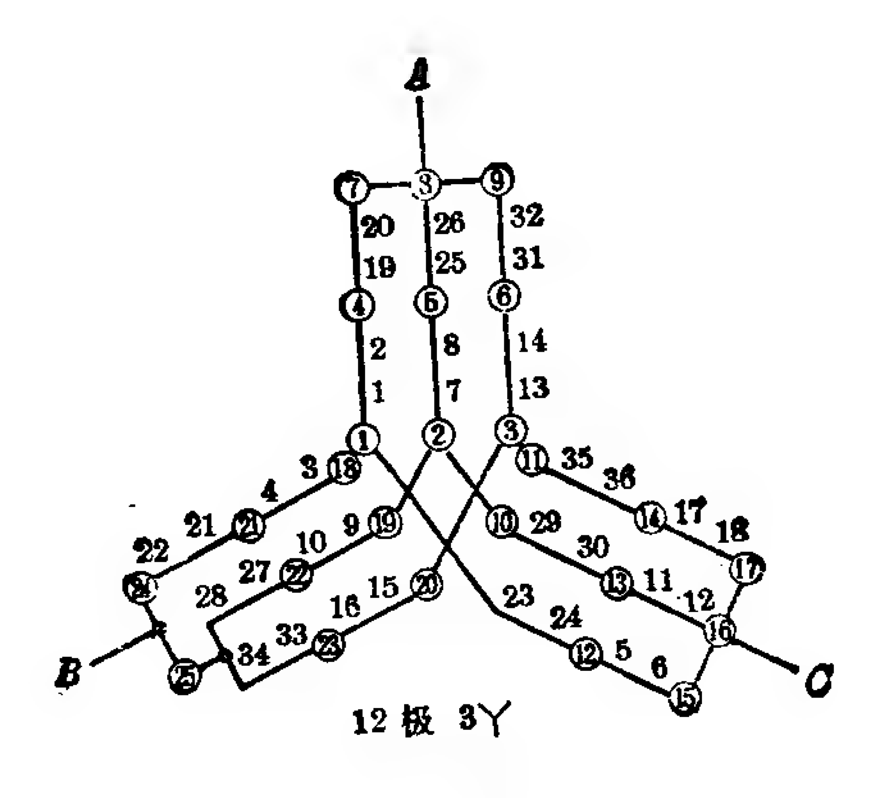


图 9-162

方案 29　4/6/8/12 极(定子 54 槽)

本方案情况与方案 28 同。四个极数的转向均相同。

绕组系数:(跨距 1-4)

四极——$K_{dY}=0.982$　$K_y=0.342$　$K_{dyY}=0.336$

$K_{d\triangle}=0.967$　$K_{dy\triangle}=0.331$

六极——$K_d=0.96$　$K_y=0.5$　$K_{dy}=0.48$

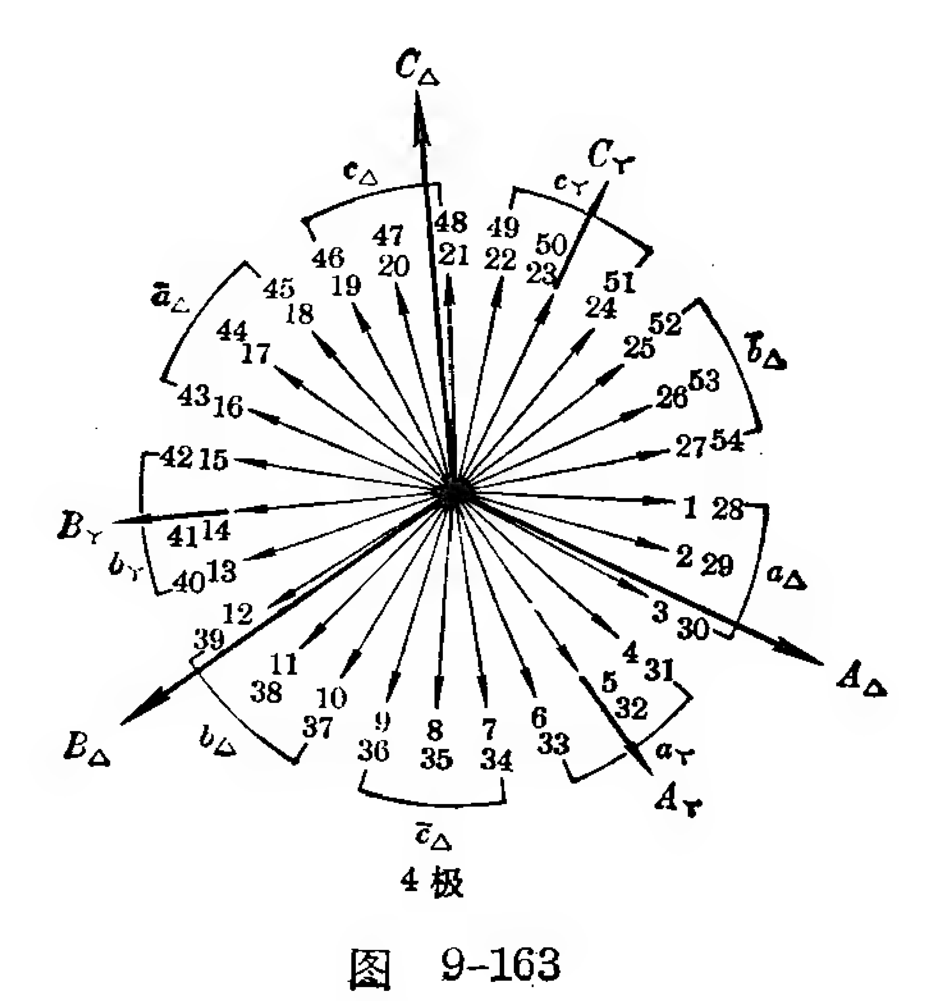
八极——$K_{dY}=0.93$　$K_y=0.643$　$K_{dyY}=0.60$

$K_{d\triangle}=0.915$　$K_{dy\triangle}=0.588$

十二极——$K_d=0.844$　$K_y=0.866$　$K_{dy}=0.731$

联结方式:

◬/2△/◬/3Y,引出线 25 根。



4 极

图 9-163

6 极

图 9-164

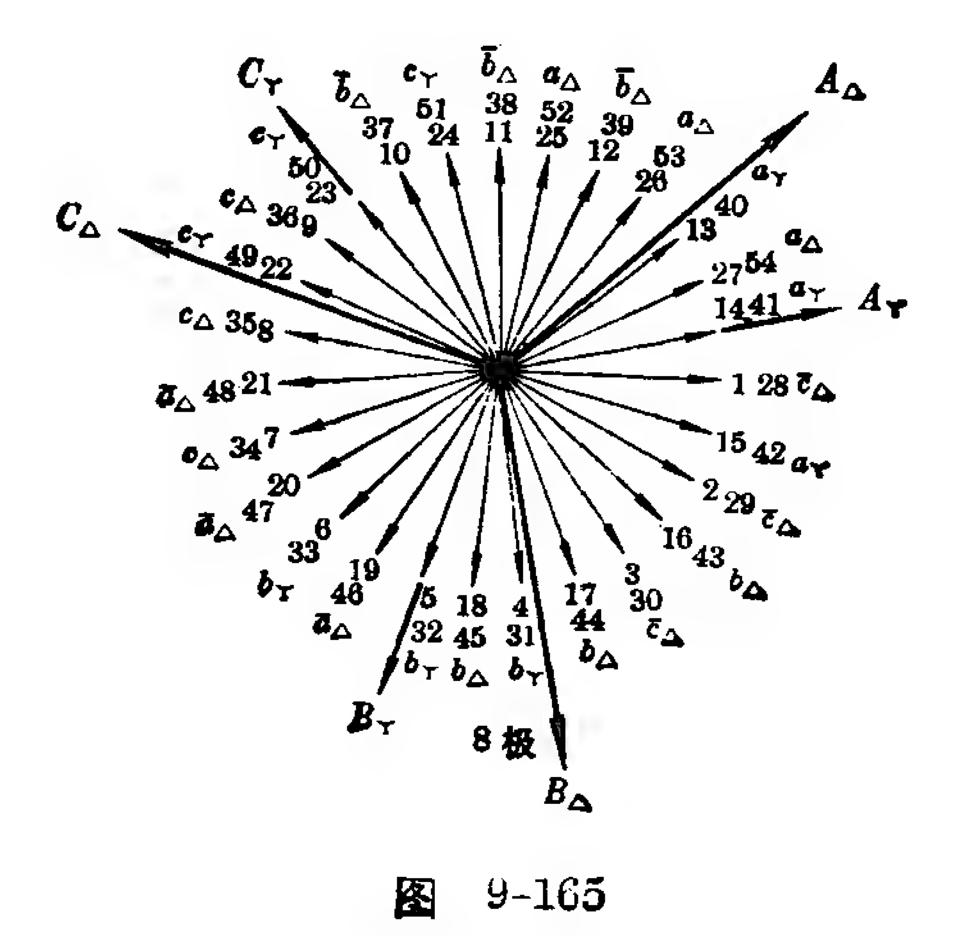


图 9-165

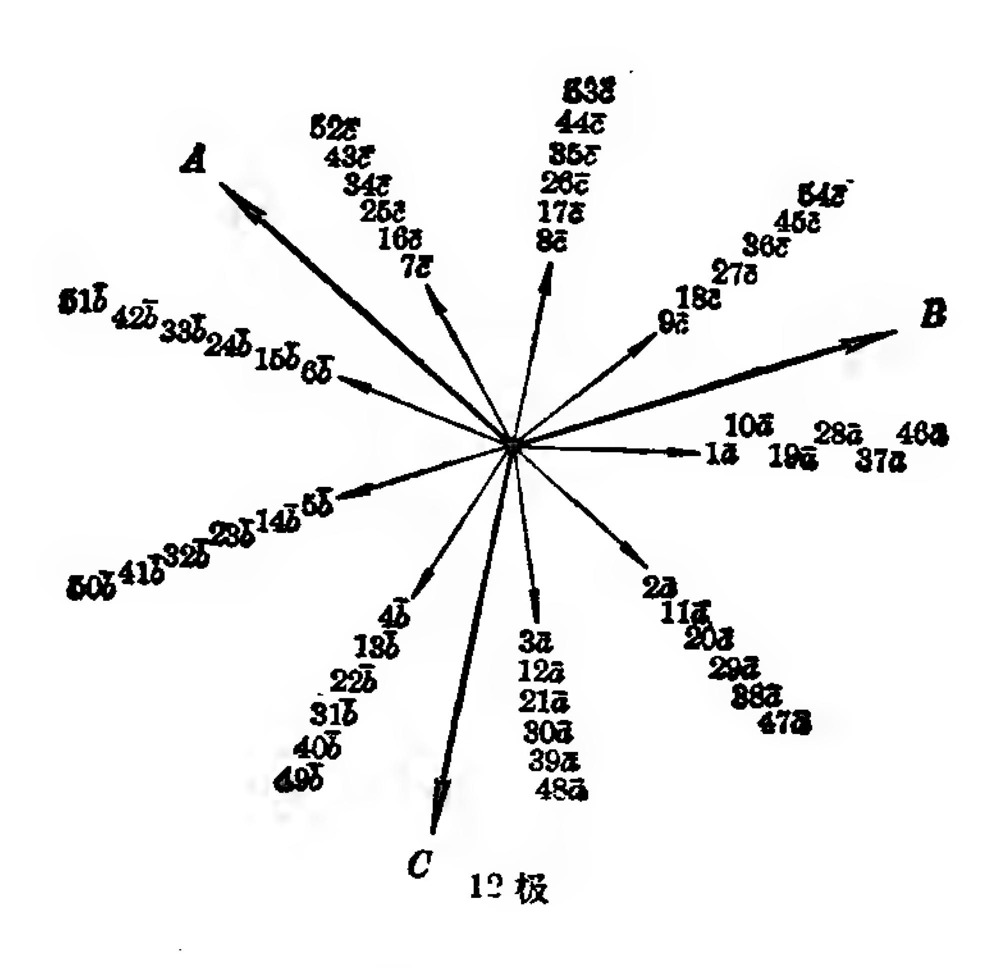
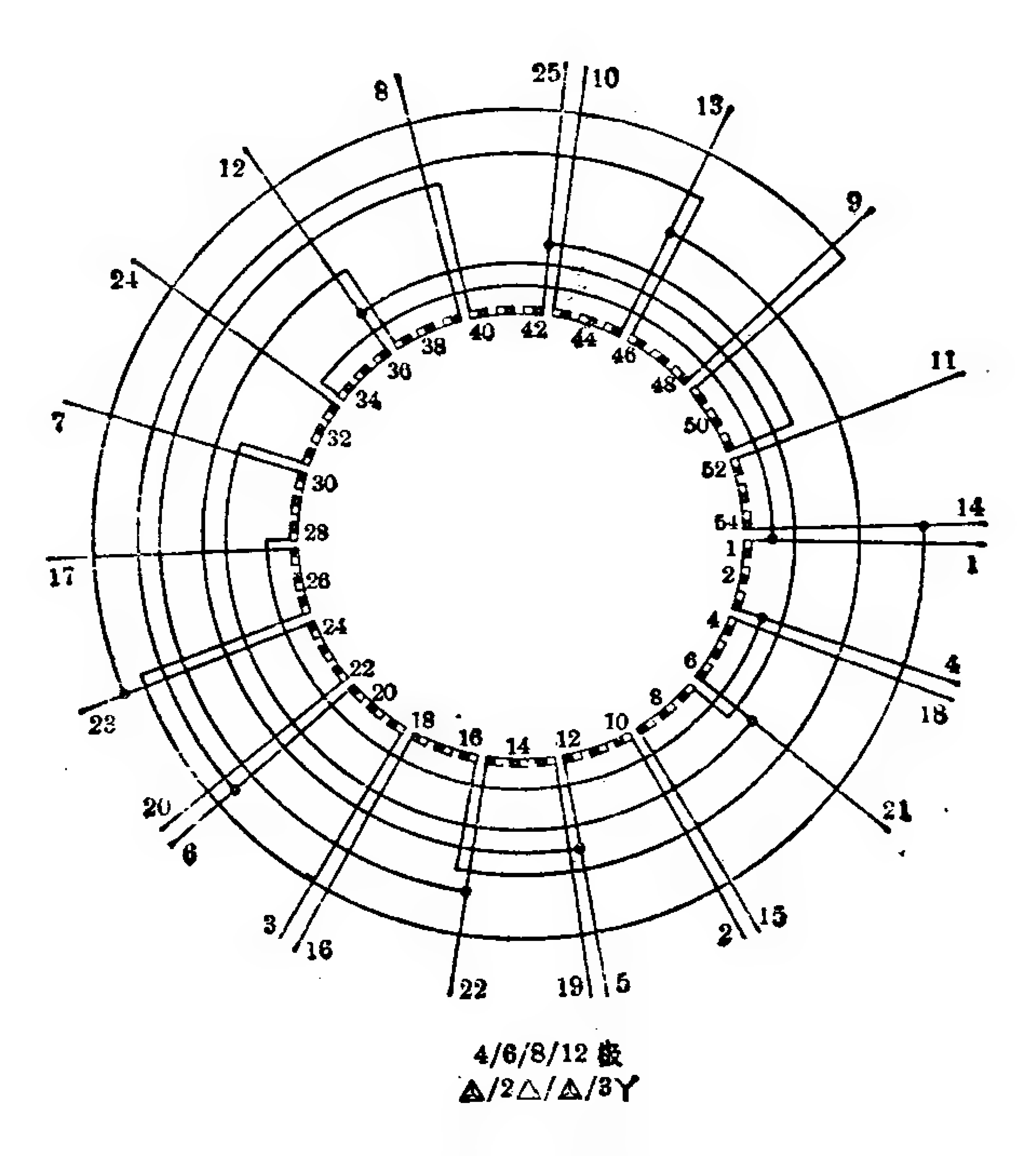


图 9-166



4/6/8/12 极
△/2△/△/3Y

图 9-167

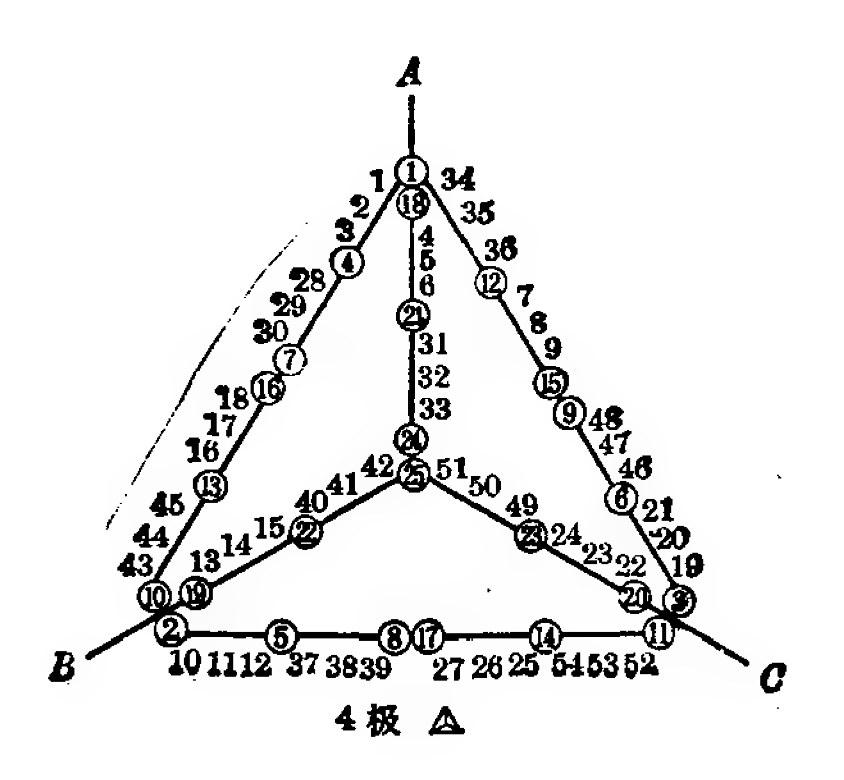


图 9-168

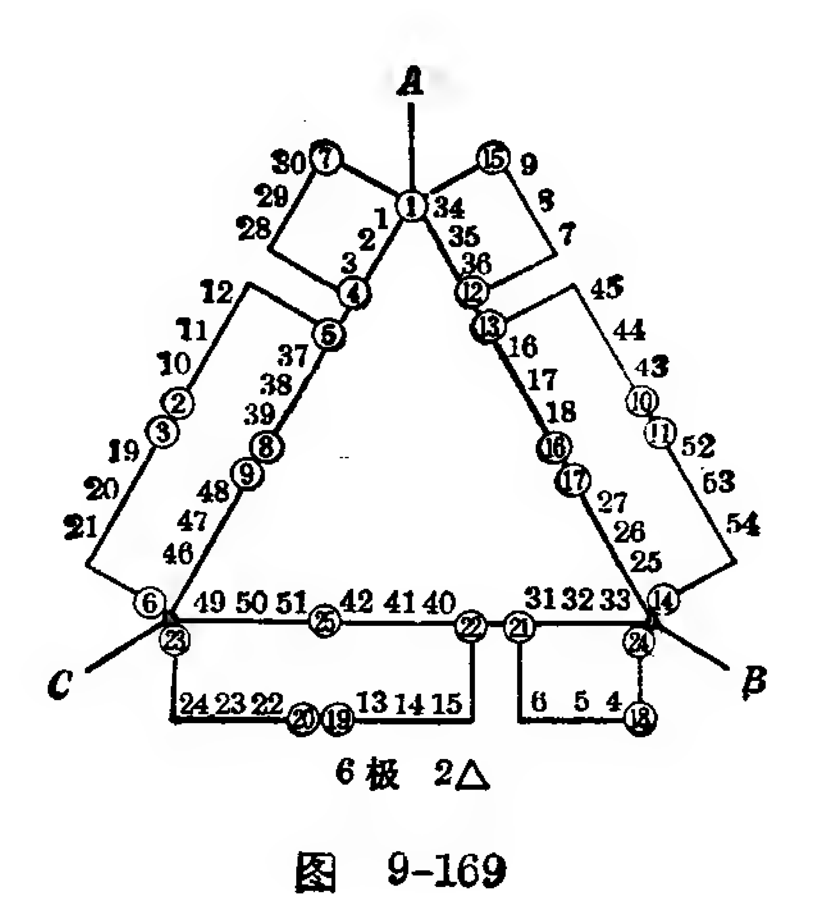


图 9-169

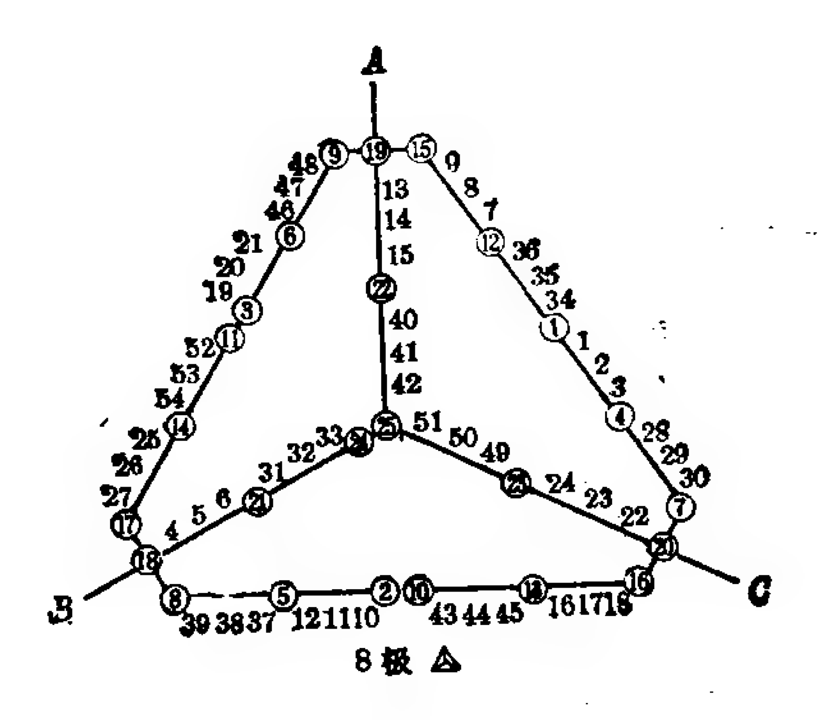


图 9-170

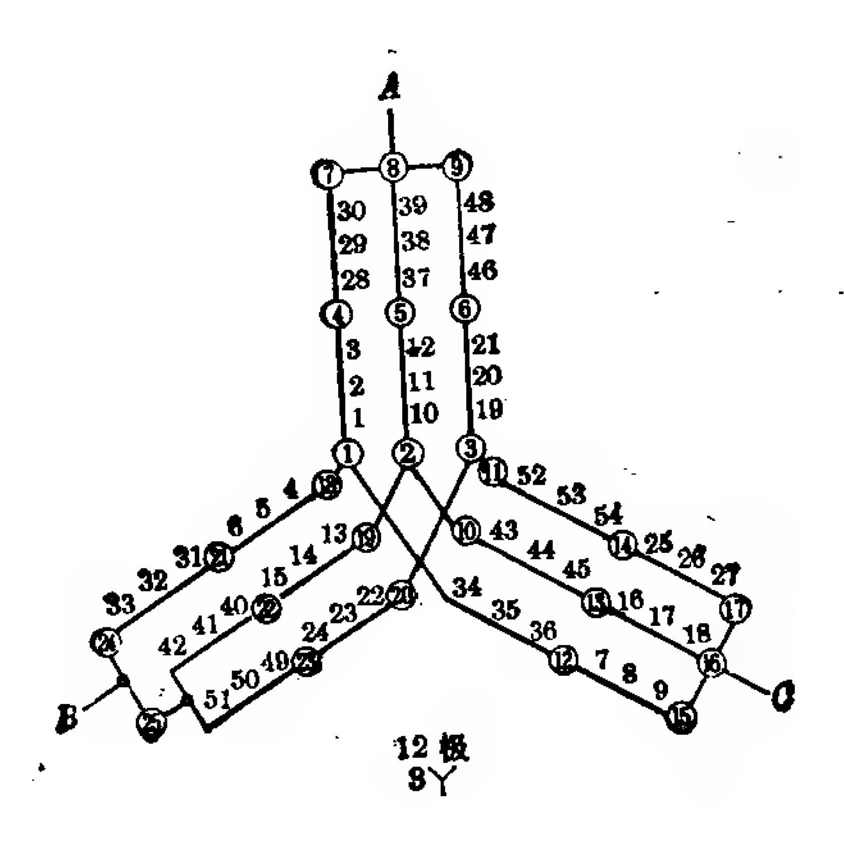


图 9-171

本书符号表

a——并联路数

B——磁通密度

$B_{m\delta}$——气隙磁通密度最大值

B_{mt}——齿部磁通密度最大值

B_{mc}——轭部磁通密度最大值

b_t——定子铁心齿宽

D——定子铁心内径

d——含绝缘在内的线径

E——相电动势

F——磁动势

f——频率

h_c——定子铁心轭高

h_s——定子槽高

I——电流

K_d——绕组分布系数

K_y——绕组短距系数

K_{dy}——基波绕组系数

$K_{dy\nu}$——ν 次谐波绕组系数

K_E——压降系数

l——定子铁心长度

M——转矩

m——相数

N——并绕根数

n——转子转速

n_1——基波同步转速

n_ν——ν 次谐波同步转速

P——功率

p——极对数

q——每极每相槽数

R——梨形槽底圆半径

S——面积

S_n——每槽导体数

S_f——槽满率

s——转差率

T——周期

t——定子铁心齿距

U——相电压

w——每相串联匝数

y——跨距

z_1——定子槽数

z_2——转子槽数

α(alfa)——相邻两槽之间的电度角

α_δ——极距系数

ϕ(fi)——磁通量

τ(tao)——极距

η(eta)——效率

$\cos\varphi$——功率因数

ν(niu)——定子谐波次数

μ(miu)——转子谐波次数

附录Ⅰ　国产多速

4/2 极

型　　号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO_2-21-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	0.45 0.6	1.32 1.5	△ 2Y	145	90	70	36/27 (斜1)
JDO_2-22-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	0.75 1	2 2.37	△ 2Y	145	90	100	36/27 (斜1)
JDO_2-12-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	1 1.2	2.67 2.85	△ 2Y	120	75	170	24/22 (斜1)
JDO_2-31-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	1.3 1.7	3.15 3.85	△ 2Y	167	104	100	36/26 (斜0.8)
JDO_2-32-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	2.1 2.8	4.6 6.2	△ 2Y	167	104	140	36/34 (斜5/4)
JDO_2-52-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	5.2 7	11.1 14.9	△ 2Y	245	150	140	36/26 (斜1/2)
JDO_2-62-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	10 13	21.8 26	△ 2Y	280	150	160	36/26 (斜1)
JDO_3T-801-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	0.5 0.7	1.45 1.82	△ 2Y	130	80	75	24/22 (斜0.8)
JDO_3T-802-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	0.7 1	1.9 2.46	△ 2Y	130	80	100	24/22 (斜0.8)
JDO_3T-90S-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	1.1 1.5	2.82 3.58	△ 2Y	145	90	100	24/22 (斜0.9)
JDO_3T-100S-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	1.3 1.7	3.06 3.86	△ 2Y	167	104	85	36/26 (斜1/2)
JDO_3T-100L-$\frac{4}{2}$	120° 60° 相带	2.1 2.8	4.81 6.28	△ 2Y	167	104	115	36/26 (斜1/2)

电动机技术数据表

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-10	162	ϕ0.41		0.75 0.84	0.69 0.72	5285 3840	9350 13600	15250 11100	0.25
1-10	120	ϕ0.49				5100 3710	9000 13100	14500 10550	0.25
1-7	140	ϕ0.57	0.768	0.77 0.84	0.74 0.76	4680 3380	10100 14720	15000 11000	0.3
1-10	106	ϕ0.69				5060 3640	10450 15000	12800 9200	0.3
1-10	74	ϕ0.86				5230 3760	10800 15500	13200 9500	0.3
1-10	46	ϕ1.4	0.75	0.84 0.90	0.85 0.79	6000 4350	9650 14000	14550 10550	0.5
1-10	36	2×ϕ1.45	0.778	0.81 0.91	0.85 0.81	6840 4960	8500 12300	14550 10550	0.6
1-8	250	ϕ0.44	0.76	0.77 0.86	0.68 0.68	5330 3500	11500 15100	18150 12000	0.25
1-8	190	ϕ0.53	0.80	0.77 0.86	0.73 0.72	5230 3520	11300 15300	17850 12000	0.25
1-8	158	ϕ0.59	0.80	0.79 0.86	0.75 0.74	5960 3750	12000 15100	12600 8000	0.25
1-10	124	ϕ0.64	0.77	0.84 0.88	0.77 0.76	5100 3650	10600 15230	11300 8100	0.3
1-10	90	ϕ0.77	0.78	0.85 0.88	0.78 0.77	5250 3770	11000 15700	11650 8350	0.3

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
$JDO_3T\text{-}112S\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	2.8 3.5	6.18 7.66	△ 2Y	188	118	110	36/32 (斜1)
$JDO_3T\text{-}112L\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	3.5 4.5	7.49 9.55	△ 2Y	188	118	140	36/32 (斜1)
$JDO_3\text{-}140S\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	5 7	10 14.9	△ 2Y	245	162	120	36/26 (斜1/2)
$JDO_3\text{-}140M\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	7 10	14 20.8	△ 2Y	245	162	170	36/26 (斜1/2)
$JDO_3\text{-}160S\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	9 12	17.8 23.6	△ 2Y	280	180	170	36/26 (斜3/4)
$JDO_3\text{-}160M\text{-}\frac{4}{2}$	120° 60°相带	13 17	25.5 32.6	△ 2Y	280	180	210	36/26 (斜3/4)

6/4 极

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
$JDO_3T\text{-}100S\text{-}\frac{6}{4}$	13	1.1 1.5	3.22 3.61	△ 2Y	167	104	85	36/32 (斜1)
$JDO_3T\text{-}100L\text{-}\frac{6}{4}$	13	1.5 2.2	4.22 5.23	△ 2Y	167	104	115	36/32 (斜1)
$JDO_3T\text{-}112S\text{-}\frac{6}{4}$	13	2.2 3	5.7 6.78	△ 2Y	188	118	110	36/32 (斜1)
$JDO_3T\text{-}112L\text{-}\frac{6}{4}$	13	3 4	7.4 8.72	△ 2Y	188	118	140	36/32 (斜1)
$JDO_3\text{-}140S\text{-}\frac{6}{4}$	13	3.5 5	7.9 11	△ 2Y	245	162	120	36/28 (斜1/2)
$JDO_3\text{-}140M\text{-}\frac{6}{4}$	13	4.5 7	10.8 15	△ 2Y	245	162	170	36/28 (斜1/2)

(续表)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-10	80	ϕ0.86	0.77	0.86 0.89	0.80 0.78	5450 4000	10800 15500	11250 8060	0.3
1-10	62	ϕ1.00		0.86 0.89	0.825 0.80	5600 4000	11080 15900	11550 8260	0.3
1-10	50	ϕ1.2	0.76	0.87 0.88	0.86 0.81	6000 4300	11250 16300	13000 9350	0.45
1-10	36	2×ϕ1.0	0.76	0.87 0.88	0.87 0.83	6000 4300	11150 16200	12800 9250	0.45
1-10	32	2×ϕ1.25	0.75	0.88 0.92	0.87 0.84	6025 4400	11000 16000	11850 8600	0.55
1-10	26	2×ϕ1.35	0.75	0.88 0.92	0.875 0.86	6100 4420	11100 16100	12000 8700	0.55

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-7	132	ϕ0.64		0.71 0.82	0.73 0.77	6720 6500	9360 13500	15000 14300	0.3
1-7	98	ϕ0.74		0.71 0.82	0.76 0.78	6700 6430	9300 13400	14800 14200	0.3
1-7	84	ϕ0.83	0.72	0.75 0.84	0.78 0.80	7300 7000	9600 13730	15000 14230	0.3
1-7	66	ϕ0.96	0.76	0.77 0.85	0.80 0.82	7360 7000	9700 14000	15200 14400	0.3
1-7	62	ϕ1.3	0.76	0.82 0.85	0.815 0.81	6640 6450	11000 16000	14100 13700	0.4
1-7	48	2×ϕ1.0	0.76	0.83 0.85	0.815 0.82	6110 5900	10100 14550	13000 12500	0.4

8/4 极

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO_2-21-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	0.25 0.37	1.11 0.9	△ 2Y	145	90	70	36/27 (斜1)
JDO_2-21-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	0.3 0.75	1.72 1.95	△ 2Y	145	94	90	36/26 (斜1/2)
JDO_2-22-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	0.45 0.75	2.04 1.8	△ 2Y	145	94	110	36/26 (斜1/2)
JDO_2-32-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	0.7 1.2	2.6 2.5	△ 2Y	167	104	140	36/34 (斜$1^1/_4$)
JDO_2-32-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	1 1.5	3.4 3.6	△ 2Y	167	104	140	36/34 (斜$1^1/_4$)
JDO_2-41-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	1.5 2.2	5 4.88	△ 2Y	210	136	100	48/38 (斜1)
JDO_2-51-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	1.5 2.5	4.6 5.9	△ 2Y	245	174	80	48/44 (斜1)
JDO_2-42-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	2 3	6.3 6.46	△ 2Y	210	136	130	48/38 (斜1)
JDO_2-52-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	2.5 3.5	7.3 7.9	△ 2Y	245	174	110	48/44 (斜1)
JDO_2-61-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	3.5 5	8.8 10.3	△ 2Y	280	200	120	48/44 (斜1)
JDO_2-61-$\frac{8}{4}$ ($U_{额}$=220伏)	120° 60°相带	3.5 5	14.9 17.7	△ 2Y	280	200	120	48/44 (斜1)
JDO_2-62-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	5 7	12.3 14.2	△ 2Y	280	200	160	48/44 (斜1)
*JDO_2-71-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	7 10	16 19.2	△ 2Y	328	230	125	54/44 (斜1)
*JDO_2-72-$\frac{8}{4}$	120° 60°相带	10 14	22.6 26.5	△ 2Y	328	230	175	48/44 (斜1)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	290	φ0.35	0.80	0.62 0.85	0.555 0.735	5780 3820	5120 6750	16500 10900	0.25
1-6	190	φ0.41	0.70	0.50 0.81	0.53 0.72	6560 4500	8725 12000	14220 9725	0.25
1-6	156	φ0.49	0.73	0.53 0.83	0.63 0.76	6620 4475	8760 11900	14350 9700	0.25
1-6	136	φ0.62				5460 3700	5630 7610	13850 9350	0.3
1-6	120	φ0.64		0.64 0.88	0.66 0.78	6250 4220	6430 8700	15820 10700	0.3
1-8	92	φ0.77		0.67 0.88	0.68 0.78	6900 4300	9000 11100	9000 14500	0.35
1-7	88	φ0.80	0.79	0.67 0.85	0.74 0.77	6670 5000	9800 14400	14450 10700	0.4
1-8	70	φ0.90		0.66 0.88	0.73 0.80	7000 4380	9100 11350	14700 9220	0.35
1-7	62	φ0.96	0.776	0.68 0.85	0.76 0.79	7000 5110	10200 15000	15000 11100	0.4
1-7	56	φ1.16	0.788	0.75 0.90	0.81 0.82	6200 4560	9000 13300	13550 10000	0.4
1-7	32	φ1.56	0.73	0.75 0.90	0.81 0.82	6260 4620	9100 13450	13730 10150	0.4
1-7	42	φ1.35	0.781	0.75 0.90	0.82 0.83	6330 4625	9200 13450	14000 10150	0.4
1-8	34	φ1.45	0.75	0.80 0.91	0.836 0.854	8570 6260	11600 15800	14840 10620	0.45
1-7	28	2×φ1.20	0.80	0.793 0.90	0.85 0.87	8340 6270	11300 16050	14620 10790	0.45

型　　号	绕　组 方　案	功率 (千瓦)	额定 电流 (安)	接 法	铁心 外径 (毫米)	铁心 内径 (毫米)	铁心 长度 (毫米)	定子槽数/转子槽数
*JDO-82-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	14 20	31 40	△ 2Y	430	310	120	54/44 (斜 1.14)
*JDO-83-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	20 28	43 54	△ 2Y	430	310	180	54/44 (斜 1.14)
JD_2-61-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	3.5 5	8.8 10.3	△ 2Y	280	200	100	48/44 (斜3/4)
JD_2-61-$_{4}^{8}$ ($U_{额}$=220 伏)	120° 60° 相带	3.5 5	15 17.8	△ 2Y	280	200	100	48/44 (斜1)
JD_2-61-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	5 7	12.4 14.2	△ 2Y	280	200	120	48/44 (斜1)
JDO_3T-90S-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	0.37 0.75	1.79 1.78	△ 2Y	145	94	105	36/26 (斜1)
JDO_3T-90S-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	0.55 1.1	2.39 2.77	△ 2Y	145	94	105	36/33 (斜1)
JDO_3T-100S-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	0.75 1.5	2.82 3.48	△ 2Y	167	114	95	36/33 (斜3/4)
JDO_3T-100L-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	1.1 2.2	3.84 4.88	△ 2Y	167	114	130	36/33 (斜3/4)
JDO_3T-112S-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	1.5 3	4.82 6.70	△ 2Y	188	128	115	36/33 (斜0.9)
JDO_3T-112L-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	2.2 3.6	6.44 7.76	△ 2Y	188	128	150	36/32 (斜1.3)
JDO_3-140S-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	3.2 4.5	7.8 9.8	△ 2Y	245	174	120	48/44 (斜1)
JDO_3-140M-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	4.5 7	11 15.3	△ 2Y	245	174	170	48/44 (斜1)
*JDO_3-1801M-$_{4}^{8}$	120° 60° 相带	11 15	24 28	△ 2Y	328	230	175	48/44 (斜1)

(续表)

跨距	每槽导体数	线 规（毫米）	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度（高斯）	轭部磁通密度（高斯）	齿部磁通密度（高斯）	气隙（毫米）
1-8	26	2×φ1.62	0.811	0.796 0.885	0.873 0.863	8480 6270	12860 17350	17150 12700	0.55
1-8	18	3×φ1.56	0.778	0.815 0.90	0.886 0.883	8150 6000	12400 16780	16510 12050	0.55
1-7	62	φ1.08	0.767	0.75 0.90	0.81 0.82	6710 4950	9750 14400	14700 10850	0.4
1-7	36	φ1.50	0.762	0.75 0.90	0.81 0.82	6650 4910	9675 14300	14600 10750	0.4
1-7	52	φ1.20	0.728	0.75 0.90	0.82 0.83	6810 5000	9900 14450	14920 10900	0.4
1-6	178	φ0.47	0.73	0.55 0.84	0.57 0.735	6150 4100	9150 12200	13000 8680	0.25
1-6	160	φ0.53		0.57 0.85	0.615 0.71	6850 4560	10200 13600	14460 9660	0.25
1-6	148	φ0.59	0.77	0.61 0.88	0.66 0.745	6700 4600	10250 14050	15000 10300	0.25
1-6	108	φ0.69	0.78	0.63 0.89	0.69 0.77	6800 4600	10400 14050	15200 10300	0.25
1-6	104	φ0.80		0.63 0.86	0.75 0.79	7175 4820	10720 14400	15550 10400	0.25
1-6	80	φ0.93		0.67 0.88	0.775 0.80	7150 4850	10700 14500	15500 10500	0.25
1-7	62	φ1.04	0.75	0.78 0.86	0.80 0.80	6400 4720	11250 16800	12800 9500	0.4
1-7	44	φ1.25	0.76	0.78 0.86	0.80 0.81	7230 5300	12800 18800	14520 10700	0.4
1-7	28	2×φ1.35		0.811 0.916	0.876 0.886	8030 6180	11360 16010	15960 11910	0.4

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
*JDO₃-1802M-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	15 22	32.4 40.7	△ 2Y	328	230	250	48/44 (斜1)
*JDO₃-200M-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	22 30	46.4 55.5	△ 2Y	368	260	240	48/44 (斜3/4)
*JDO₃-225S-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	28 40	62.6 74	△ 2Y	368	245	270	48/44 (斜1/2)
*JDO₃-250S-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	40 55	86 100	△ 2Y	405	275	320	48/58 (斜1/2)
*JO-93-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	28 40	63.5 76.5	△ 2Y	500	330	165	72/58 (斜1¼)
*JO-94-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	40 55	89.5 97.2	△ 2Y	500	330	235	72/58 (斜1¼)
JOB-TH-$\frac{8}{4}$	120° 60° 相带	75 150	205 290	△ 2Y	850	590	480	72/86 (槽斜度25毫米)

12/6 极

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO₂-61-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	2 3.5	6.3 7.18	△ 2Y	280	200	120	54/63 (斜3/4)
JDO₂-62-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	3 5	9.45 10.25	△ 2Y	280	200	160	54/63 (斜3/4)
*JDO₂-71-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	4.5 7	13 14.5	△ 2Y	328	230	125	54/44 (斜1)
*JDO₂-72-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	6.5 10	18 20	△ 2Y	328	230	175	54/44 (斜1)

(续表)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-7	20	3×ϕ1.30	0.794	0.81 0.923	0.88 0.89	7950 6060	11100 15700	15800 11680	0.4
1-7	18	4×ϕ1.35	0.835	0.81 0.917	0.897 0.90	8130 6200	11450 16170	16020 11850	0.45
1-7	18	6×ϕ1.45	0.807	0.75 0.90	0.906 0.913	7070 5720	11900 16600	16280 12600	0.6
1-7	26 $a=2$(8极) $a=4$(4极)	4×ϕ1.56	0.797	0.77 0.90	0.92 0.921	7300 5980	12400 17100	16650 13100	0.6
1-10	14	5×ϕ1.56	0.708	0.755 0.905	0.885 0.878	8110 6130	9930 13850	16100 12000	0.9
1-10	10	7×ϕ1.56	0.708	0.762 0.923	0.897 0.90	8010 6025	9770 13600	15950 10800	0.9
1-10	4	2-3.05×6.9 双玻包 铜扁线		0.614 0.885	0.90 0.89	5200 4000	5560 8400	14370 11050	

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	74	ϕ1.04	0.80	0.66 0.89	0.71 0.81	6150 4150	7930 10700	11360 7700	0.4
1-6	52	ϕ1.16	0.70	0.66 0.89	0.73 0.83	6640 4530	9200 12500	12300 8370	0.4
1-6	50	ϕ1.20	0.77	0.70 0.885	0.772 0.83	8530 6000	7700 10000	15300 10300	0.45
1-6	36	ϕ1.40	0.79	0.692 0.892	0.785 0.843	8840 5940	7780 10100	15200 10200	0.45

型号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
*JDO-82-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	9 14	24 28	△ 2Y	430	310	120	54/44 (斜 1.14)
*JDO-83-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	12.5 20	32 39	△ 2Y	430	310	180	54/44 (斜 1.14)
*JO-93-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	18 28	54.7 57.6	△ 2Y	500	360	165	72/58 (斜 1)
*JO-94-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	25 40	76 80	△ 2Y	500	360	235	72/58 (斜 1)
JDO_3-160S-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	3.5 7	10.7 14.4	△ 2Y	280	200	180	54/63 (斜 1)
JDO_3-160M-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	4.5 10	13.6 20.4	△ 2Y	280	200	240	54/63 (斜 1)
*JDO_3-1801M-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	6.5 11	17.4 22	△ 2Y	328	230	175	54/44 (斜 1)
*JDO_3-1802M-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	9 15	24.3 30	△ 2Y	328	230	250	54/44 (斜 1)
*JDO_3-200M-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	14 22	36.5 42.5	△ 2Y	368	260	260	54/44 (斜 3/4)
*JDO_3-225S-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	18 28	49 53.3	△ 2Y	368	260	305	72/58 (斜 1.2)
*JDO_3-250S-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	25 40	70.7 75.9	△ 2Y	405	275	320	72/58 (斜 1.2)
JOB-TH-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	50 100	184 205	△ 2Y	850	590	480	72/86 (槽斜度25毫米)
JOB-TH-$\frac{12}{6}$	120° 60° 相带	110 220	269 393	△ 2Y	740	540	410	72/86

(续表)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	36	2×ϕ1.35	0.79	0.70 0.874	0.81 0.848	9100 6360	11100 14400	15800 10700	0.55
1-6	24	2×ϕ1.62	0.74	0.70 0.88	0.857 0.88	8900 6360	11180 14400	15400 10700	0.55
1-7	20	3×ϕ1.68	0.633	0.61 0.87	0.82 0.85	7280 5600	9310 14300	15080 11600	0.7
1-7	14	5×ϕ1.56	0.565	0.61 0.87	0.87 0.87	7300 5800	9650 14600	16320 12320	0.7
1-6	46	ϕ1.25	0.723	0.67 0.88	0.74 0.84	6620 4600	8620 11900	12300 8550	0.4
1-6	36	2×ϕ1.0	0.74	0.67 0.88	0.75 0.85	6480 4400	8380 11400	12000 8160	0.4
1-6	32	2×ϕ1.08	0.803	0.695 0.89	0.818 0.853	8800 6560	9240 11900	15960 11050	0.4
1-6	22	2×ϕ1.30	0.79	0.672 0.888	0.837 0.871	8960 6680	9400 12100	16250 11250	0.4
1-6	18	3×ϕ1.35	0.795	0.67 0.883	0.871 0.891	9210 6940	11140 14320	15950 11040	0.45
1-7	44 a=3(12极) a=6(6极)	2×ϕ1.25	0.805	0.637 0.877	0.876 0.905	7260 5850	11400 16000	16300 12480	0.5
1-7	40 a=3(12极) a=6(6极)	ϕ1.56 +ϕ1.62	0.797	0.61 0.87	0.88 0.91	6900 5800	10140 14100	16800 13100	0.6
1-7	6	2-1.81×6.9 双玻包 铜扁线		0.48 0.82	0.86 0.90	5030 3950	3550 5560	13900 10900	1.0
1-7	14 a=3(12极) a=6(6极)	2-2.63×4.7 双玻包 铜扁线	—	0.663 0.917	0.94 0.93	8000 6620	9400 14250	16240 13450	0.8

24/6 极(电梯专用)

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JTD-430	24	60° 相带	—	—	Y	430	305	100	72/113 (斜 2)
	6	60° 相带	6.4	21.5	Y				
JTD-430	24	60° 相带	—	—	Y	430	305	125	72/113 (斜 2)
	6	60° 相带	7.5	23.7	Y				
JTD-430	24	60° 相带	—	—	Y	430	305	165	72/113 (斜 2)
	6	60° 相带	11.2	35	Y				
JTD-560	24	60° 相带	—	—	Y	560	410	135	72/113 (斜 2)
	6	60° 相带	15	41.1	Y				
JTD-560	24	60° 相带	—	—	Y	560	410	150	72/113 (斜 2)
	6	60° 相带	19	51.3	Y				
JTD-333	24	180°相带	—	—	Y	340	230	100	72/86 (斜 1)
	6	120°相带	6.4	18	2Y				
JTD-333	24	180°相带	—	—	Y	340	230	120	72/86 (斜 1)
	6	120°相带	7.5	21	2Y				
JTD-333	24	180°相带	—	—	Y	340	230	175	72/86 (斜 1)
	6	120°相带	11.2	30	2Y				
JTD/430	24	180°相带	—	—	Y	440	305	145	72/113 (斜 1)
	6	120°相带	15	41	2Y				
JTD-430	24	180°相带	—	—	Y	440	305	165	72/113 (斜 1)
	6	120°相带	19	48.6	2Y				

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-4	40	ϕ1.35	—	—	—	5100	3420	11500	0.8
1-13	40 $a=3$	ϕ1.45				5370	14400	12090	
1-4	32	ϕ1.56	—	—	—	4800	3220	10900	0.8
1-13	32 $a=3$	ϕ1.56				5400	14400	12150	
1-4	24	ϕ1.81	—	—	—	4840	3230	11000	0.95
1-13	24 $a=3$	ϕ1.81				5460	14610	12390	
1-4	22	ϕ1.81	—	—	—	4970	2820	9850	0.8
1-13	14 $a=2$	2×ϕ1.81				5880	13300	11640	
1-4	20	ϕ2.02	—	—	—	4940	2800	9880	0.8
1-13	12 $a=2$	2×ϕ2.02				6140	13940	12200	
1-10	36	ϕ1.56	—	—	—	8250	3850	14100	0.7
						7880	14700	13550	
1-10	32	ϕ1.62	—	—	—	7750	3620	13200	0.7
						7425	13850	12700	
1-10	22	2×ϕ1.4	—	—	—	7730	3600	13250	0.7
						7400	13750	12600	
1-10	22	3×ϕ1.62	—	—	—	6975	3760	14100	1
						6775	14600	13700	
1-10	20	3×ϕ1.74	—	—	—	6750	3640	13650	0.8
						6450	13900	13000	

6/4/2 极

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO$_2$-31-	4 2	120° 60° 相带	0.75 1	2.1 2.8	△ 2Y	167	104	100	36/27 (斜1)
	6	60° 相带	0.6	1.91	Y				
JDO$_2$-32-	4 2	120° 60° 相带	1.3 1.7	3.4 4.25	△ 2Y	167	104	125	36/27 (斜1)
	6	60° 相带	1	2.84	Y				
JDO$_3$T-100S-	6 4	13	0.7 1	2.64 3.1	△ 2Y	167	104	85	36/32 (斜1)
	2	60° 相带	1.3	3.06	Y				
JDO$_3$T-100L-	6 4	13	1 1.3	3.61 3.86	△ 2Y	167	104	115	36/32 (斜1)
	2	60° 相带	2	4.52	Y				
JDO$_3$T-112S-	6 4	13	1.3 2	4.05 4.92	△ 2Y	188	118	110	36/32 (斜1)
	2	60° 相带	2.6	5.9	Y				
JDO$_3$T-112L-	6 4	13	2 2.6	5.8 6.33	△ 2Y	188	118	140	36/32 (斜1)
	2	60° 相带	3.2	7.1	Y				
JDO$_3$-140S-6 4 2		22	2.5 3 3.5	6.8 6.5 9.1	3Y △ △	245	150	120	36/26 (斜1/2)
JDO$_3$-140M-6 4 2		22	3 3.8 4.5	8 8 11.3	3Y △ △	245	150	170	36/26 (斜1/2)

注：JDO$_3$-140S-6、4、2 和 JDO$_3$-140M-6、4、2 两个单绕组三速电动机中

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-10	114	ϕ0.44				4660 3400	9600 14000	11800 8575	0.3
1-6	80	ϕ0.55				5060	7000	12800	
1-10	88	ϕ0.55				4870 3500	10050 14450	12300 8850	0.3
1-6	57	ϕ0.67				5750	7900	14530	
1-7	128	ϕ0.47		0.61 0.70	0.66 0.70	6785 6520	9430 13600	15050 14450	0.3
1-18 2-17 3-16	43	ϕ0.74		0.88	0.735	3860	16100	8550	
1-7	96	ϕ0.57		0.61 0.70	0.69 0.73	6800 6550	9460 13650	15100 14500	0.3
1-18 2-17 3-16	32	ϕ0.83		0.89	0.755	3830	16000	8500	
1-7	86	ϕ0.64		0.65 0.79	0.75 0.78	6930 6740	9200 13420	14300 14000	0.3
1-18 2-17 3-16	27	ϕ0.93		0.88	0.76	4240	16800	8750	
1-7	68	ϕ0.74		0.68 0.79	0.77 0.79	6950 6700	9240 13320	14330 13800	0.3
1-18 2-17 3-16	22	ϕ1.0		0.88	0.78	4080	16200	8430	
1-7	140	ϕ0.80	0.78	0.71 0.89 0.89	0.78 0.79 0.66	5730 4100 3440	6160 6620 11100	14050 10050 8675	0.5
1-7	108	ϕ0.90	0.76	0.72 0.89 0.89	0.79 0.82 0.68	5300 3750 3140	5700 6060 10150	13000 9200 7700	0.5

2 极和 4 极磁密均为丫部分的磁密数据

8/4/2 极

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
$JDLO_2$-41-	8	24	0.5	2.66	2Y	210	136	120	36/26 (斜1)
	4		1.2	2.92	2△				
	2		1.5	3.12	2△				
JDO_2-42-	8	24	1.1	4.08	2Y	210	136	135	36/26 (斜0.6)
	4		1.7	4	2△				
	2		2.2	4.9	2△				
JDO_2-52-	8	24	1.8	6.5	2Y	245	162	140	36/46 (斜1)
	4		4	9	2△				
	2		4.5	9.6	2△				
JDO_3T-100S-	8	24	0.4	2.05	2Y	167	104	85	36/32 (斜1)
	4		1.1	2.61	2△				
	2		1.5	3.34	2△				
JDO_3T-100L-	8	24	0.6	2.76	2Y	167	104	115	36/32 (斜1)
	4		1.5	3.56	2△				
	2		2.2	5	2△				
JDO_3T-112S-	8	24	0.8	3.76	2Y	188	118	110	36/32 (斜1)
	4		2.2	4.8	2△				
	2		3	6.5	2△				
JDO_3T-112L-	8	24	1.3	5.25	2Y	188	118	140	36/32 (斜1)
	4		3	6.4	2△				
	2		4	8.35	2△				

跨距	每槽导体数	线规（毫米）	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度（高斯）	轭部磁通密度（高斯）	齿部磁通密度（高斯）	气隙（毫米）
1-7与1-13	158	ϕ0.64	0.75	0.46	0.62	5450	5900	8950	0.35
				0.76	0.82	4350	9300	7130	
				0.90	0.81	2700	11550	4420	
1-7与1-13	124	ϕ0.72		0.65	0.63	6300	6860	10350	0.35
				0.81	0.80	4970	10650	8170	
				0.94	0.73	3080	13200	5060	
1-7与1-13	102	ϕ0.96	0.765	0.60	0.70	6180	7570	13500	0.5
				0.80	0.85	5000	12200	10850	
				0.95	0.75	3100	15100	6730	
1-7与1-13	240	ϕ0.47		0.54	0.55	6830	7140	15100	0.3
				0.81	0.79	5200	10860	11520	
				0.90	0.76	3270	13650	7230	
1-7与1-13	184	ϕ0.53		0.57	0.58	6430	6700	14220	0.3
				0.80	0.80	5080	10580	11200	
				0.87	0.77	3150	13130	7000	
1-7与1-13	150	ϕ0.64		0.53	0.61	7275	7210	15000	0.3
				0.84	0.83	5800	11500	12000	
				0.90	0.78	3600	14300	7410	
1-7与1-13	116	ϕ0.72		0.57	0.66	7600	7760	15600	0.3
				0.85	0.84	5900	11700	12100	
				0.90	0.81	3660	14500	7525	

8/6/4 极

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO_2-51-	8 4	120° 60° 相带	1.2 2.1	4.2 5	△ 2Y	245	174	80	36/44 (斜1)
	6	60°相带	1.75	4.87	Y				
JDO_2-62-	8 4	120° 60° 相带	3.5 5	9.1 10.5	△ 2Y	280	200	150	60/48 (斜1)
	6	60°相带	4.5	10.2	Y				
*JDO_2-71-	8 4	120° 60° 相带	5 7	12.3 14.7	△ 2Y	328	230	125	54/44 (斜1)
	6	60°相带	6.5	13.8	Y				
*JDO_2-72-	8 4	120° 60° 相带	7 10	17.3 19.8	△ 2Y	328	230	175	54/44 (斜1)
	6	60°相带	9	18.5	Y				
*JDO-82-	8 4	120° 60° 相带	10 14	22 29.2	△ 2Y	430	310	120	54/44 (斜 1.14)
	6	60°相带	12.5	25	Y				
*JDO-83-	8 4	120° 60° 相带	14 20	30 40	△ 2Y	430	310	180	54/44 (斜 1.14)
	6	60°相带	18	36	Y				
*JO-94-	8 4	120° 60° 相带	28 40	68.3 82.5	△ 2Y	500	330	235	72/58 (斜 0.62)
	6	60°相带	36	76.8	Y				
JDO_3T-100S-	8 6 4	26	0.6 0.8 1.1	2.4 2.92 2.63	2Y 2Y 2Y	167	114	90	36/32 (斜1)
JDO_3T-100L-	8 6 4	26	1 1.3 1.7	3.64 4.34 4	2Y 2Y 2Y	167	114	125	36/32 (斜1)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	122	ϕ0.72	0.75	0.65 0.88	0.665 0.74	6450 4350	11500 15500	15500 10500	0.4
1-6	52	ϕ0.96		0.76	0.73	5880	14000	14200	
1-9	42	ϕ1.0	0.76	0.80 0.91	0.73 0.79	5330 3720	9000 12500	13600 9480	0.4
1-10	18	ϕ1.3		0.86	0.78	4800	10750	12200	
1-8	40	ϕ1.12	0.784	0.796 0.893	0.79 0.81	7350 5270	11400 16280	14030 9820	0.45
	20	ϕ1.56		0.89	0.82	6100	12550	11400	
1-8	28	ϕ1.30	0.7	0.788 0.888	0.808 0.836	7500 5370	12010 16510	14320 10020	0.45
	14	2×ϕ1.25		0.886	0.841	6220	12770	11630	
1-8	30	ϕ1.62	0.757	0.821 0.882	0.834 0.824	7320 5390	12350 16750	15080 11000	0.55
1-9	14	2×ϕ1.56		0.882	0.846	6390	13230	13020	
1-8	20	2×ϕ1.35	0.736	0.813 0.893	0.854 0.85	7320 5390	12350 16750	15080 11000	0.55
1-9	10	4×ϕ1.35		0.893	0.867	5950	12330	12130	
1-10	12	4×ϕ1.56	0.56	0.76 0.90	0.82 0.82	6820 4870	10600 15100	15800 10900	0.75
1-11	16 $a=3$	3×ϕ1.40		0.86	0.83	5920	12200	13250	
1-6	176	ϕ0.53	0.772	0.56 0.64 0.81	0.68 0.65 0.715	6910 6880 4000	10500 14000 12200	15470 15420 9000	0.25
1-6	128	ϕ0.64	0.78	0.58 0.66 0.89	0.72 0.69 0.725	6870 6910 4040	10500 14100 12350	15400 15500 9050	0.25

型　　号	绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO$_3$T-112S-8 6 4	26	1.3 1.5 2	4.37 4.71 4.41	2Y 2Y 2Y	188	128	115	36/32 (斜1)
JDO$_3$T-112L-8 6 4	26	2 2.2 2.8	6.43 6.51 6.05	2Y 2Y 2Y	188	128	150	36/32 (斜1.3)
JDO$_3$-140S-8 6 4	26	2 2.8 3.5	6.06 7.9 7.7	2Y 2Y 2Y	245	162	120	36/26 (斜1/2)
JDO$_3$-140M-8 6 4	26	3 4 5	9.1 11.6 10.6	2Y 2Y 2Y	245	162	170	36/26 (斜1/2)
JDO$_3$-160S-8 6 4	26	4.5 5.5 7.5	13 14.5 15.8	2Y 2Y 2Y	280	180	170	36/26 (斜3/4)
JDO$_3$-160M-8 6 4	26	5.5 7 10	15 17.5 20.5	2Y 2Y 2Y	280	180	210	36/26 (斜3/4)
*JDO$_3$-1801M-8 4	120° 60°相带	7.5 11	17.4 22.2	△ 2Y	328	230	175	54/44 (斜1)
*JDO$_3$-1801M-6	60°相带	10	20	Y				
*JDO$_3$-1802M-8 4	120° 60°相带	10 15	23 30	△ 2Y	328	230	250	54/44 (斜1)
*JDO$_3$-1802M-6	60°相带	13	25.7	Y				
*JDO$_3$-200M-8 4	120° 60°相带	15 22	32.8 41.7	△ 2Y	368	260	260	54/44 (斜3/4)
*JDO$_3$-200M-6	60°相带	18.5	35.6	Y				
*JDO$_3$-225S-8 4	120° 60°相带	20 28	45.2 52	△ 2Y	368	250	290	72/58 (斜1.21)
*JDO$_3$-225S-6	60°相带	25	48.4	Y				
*JDO$_3$-250S-8 4	120° 60°相带	28 40	61.5 71.6	△ 2Y	405	275	320	72/58 (斜1/2)
*JDO$_3$-250S-6	60°相带	36	68.9	Y				

(续表)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	120	ϕ0.74	0.77	0.61 0.68 0.89	0.74 0.71 0.775	7200 7250 4180	10750 14450 12500	15500 15650 9050	0.25
1-6	92	ϕ0.86	0.79	0.63 0.69 0.89	0.75 0.735 0.79	7275 7325 4180	10900 14600 12500	15750 15850 9050	0.25
1-5	98	ϕ0.90	0.78	0.65 0.70 0.88	0.77 0.77 0.79	6700 7525 4630	6350 9400 8770	14700 16450 10100	0.45
1-5	70	ϕ1.04	0.76	0.65 0.70 0.88	0.77 0.77 0.79	6700 7600 4630	6350 9600 8770	14700 16550 10100	0.45
1-6	62	ϕ1.30	0.755	0.68 0.72 0.88	0.78 0.80 0.82	6900 7050 4020	6280 8575 7330	13520 13820 7880	0.5
1-6	52	ϕ1.40	0.765	0.70 0.74 0.88	0.79 0.82 0.84	6700 6870 3920	6110 8375 7150	13200 13500 7700	0.45
1-8	26	ϕ1.35	0.796	0.783 0.89	0.835 0.844	7670 5700	12300 16730	15300 10930	0.4
	14	2×ϕ1.35		0.897	0.847	6120	11960	11700	
1-8	18	2×ϕ1.16	0.783	0.781 0.881	0.848 0.86	7750 5760	12420 16900	15450 11040	0.4
	10	3×ϕ1.25		0.898	0.858	5980	11730	11460	
1-8	16	2×ϕ1.40	0.795	0.80 0.91	0.87 0.88	7600 5520	11900 16300	14600 10170	0.45
1-8	8	4×ϕ1.30		0.898	0.878	6380	12580	11750	
1-11	12	4×ϕ1.40	0.795	0.757 0.905	0.888 0.90	6750 4920	13700 17280	16400 11500	0.5
1-12	16 $a=3$	2×ϕ1.45		0.87	0.898	6060	15200	14500	
1-11	10	5×ϕ1.40	0.794	0.772 0.937	0.895 0.902	6900 4900	11900 15200	15500 10600	0.6
1-12	13 $a=3$	3×ϕ1.35		0.872	0.904	6250	13600	13800	

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JD_2-61-	8 4	120° 60° 相带	1.3 2.2	4.06 5.2	△ 2Y	280	200	100	60/34 (斜3/4)
	12 6	120° 60° 相带	1 1.7	3.88 4.08	△ 2Y				
JDO_2-61-	8 4	120° 60° 相带	2 3	5.8 6.9	△ 2Y	280	200	120	60/34 (斜3/4)
	12 6	120° 60° 相带	1.3 2.5	4.9 5.8	△ 2Y				
JDO_2-62-	8 4	120° 60° 相带	3 4.5	8.1 10	△ 2Y	280	200	160	60/34 (斜3/4)
	12 6	120° 60° 相带	2 3.5	7.4 8	△ 2Y				
*JDO_2-71-	8 4	120° 60° 相带	4 6.5	10.7 14	△ 2Y	328	230	125	54/44 (斜1)
	12 6	120° 60° 相带	3 5	9.3 11.2	△ 2Y				
*JDO_2-72-	8 4	120° 60° 相带	6 9	15 18.3	△ 2Y	328	230	175	54/44 (斜1)
	12 6	120° 60° 相带	4 7	12.4 14.6	△ 2Y				
*JDO-82-	8 4	120° 60° 相带	8.5 12.5	19.3 26.4	△ 2Y	430	310	120	54/44 (斜1.14)
	12 6	120° 60° 相带	6 10	16.6 20.7	△ 2Y				
*JDO-83-	8 4	120° 60° 相带	11 18	25 36.6	△ 2Y	430	310	180	54/44 (斜1.14)
	12 6	120° 60° 相带	8.5 14	23 28	△ 2Y				
*JO-93-	8 4	120° 60° 相带	17 25	39.2 49	△ 2Y	500	360	165	72/86 (斜1.41)
	12 6	120° 60° 相带	12 20	33.8 39	△ 2Y				
*JO-94-	8 4	120° 60° 相带	24 36	57.2 68.5	△ 2Y	500	360	235	72/86 (斜1.41)
	12 6	120° 60° 相带	17 28	45.2 53.8	△ 2Y				

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-9	70	ϕ0.74	0.70	0.70 0.89	0.69 0.72	4680 3270	9510 13300	12800 8930	0.5
1-6	100	ϕ0.72		0.63 0.87	0.62 0.73	4880 2500	6630 6780	13350 6820	
1-9	56	ϕ0.83	0.752	0.75 0.90	0.70 0.73	4930 3450	10000 14000	13480 9410	0.4
1-6	80	ϕ0.74		0.64 0.88	0.63 0.74	5100 2620	6900 7100	14000 7150	
1-9	42	ϕ0.96	0.771	0.75 0.90	0.72 0.75	4980 3480	10100 14150	13620 9520	0.4
1-6	58	ϕ0.93		0.64 0.88	0.64 0.76	5330 2750	7230 7450	14600 7500	
1-8	40	ϕ1.08	0.80	0.774 0.894	0.784 0.80	7350 5270	11400 16280	14030 9820	0.45
1-6	58	ϕ0.96		0.704 0.887	0.698 0.786	7580 5120	8100 10640	14440 9670	
1-8	28	ϕ1.25	0.783	0.766 0.883	0.806 0.83	7500 5370	12010 16510	14320 10020	0.45
1-6	42	ϕ1.12		0.695 0.888	0.74 0.811	7460 5030	8000 10460	14220 9500	
1-8	30	ϕ1.56	0.775	0.813 0.881	0.824 0.82	7320 5390	12350 16750	15080 11000	0.55
1-6	42	ϕ1.42		0.714 0.886	0.769 0.83	7650 5460	8800 11310	16100 11130	
1-8	20	2×ϕ1.30	0.758	0.795 0.882	0.848 0.847	7320 5390	12350 16750	15080 11000	0.55
1-6	28	2×ϕ1.20		0.703 0.888	0.804 0.858	7650 5460	8800 11310	16100 11130	
1-12	16	2×ϕ1.50 +ϕ1.45	0.638	0.773 0.921	0.84 0.84	6800 4240	14120 16700	16050 9680	0.7
1-7	22	2×ϕ1.56		0.653 0.89	0.816 0.857	6360 5210	10100 14750	16230 12250	
1-12	11	4×ϕ1.50	0.68	0.736 0.915	0.857 0.868	6960 4310	15100 17100	16250 10000	0.7
1-7	16	3×ϕ1.56		0.669 0.897	0.841 0.872	6220 5000	9700 13600	15800 11750	

型号		绕组方案	功率(千瓦)	额定电流(安)	接法	铁心外径(毫米)	铁心内径(毫米)	铁心长度(毫米)	定子槽数/转子槽数
JDO$_3$-140S-	8	120°相带	1.5	4.65	△	245	162	120	36/44 (斜1)
	4	60°相带	3	7.4	2Y				
	12	120°相带	1	3.6	△				
	6	60°相带	2.2	6	2Y				
JDO$_3$-140M-	8	120°相带	2.2	9	△	245	162	170	36/44 (斜1)
	4	60°相带	4	8.4	2Y				
	12	120°相带	1.3	6	△				
	6	60°相带	3	8	2Y				
JDO$_3$-160S-	8	120°相带	3.5	10.2	△	280	200	180	60/34 (斜3/4)
	4	60°相带	5.5	12.5	2Y				
	12	120°相带	2.2	8	△				
	6	60°相带	4.5	10.4	2Y				
JDO$_3$-160M-	8	120°相带	4.5	12.2	△	280	200	240	60/34 (斜3/4)
	4	60°相带	7	15	2Y				
	12	120°相带	2.8	9.2	△				
	6	60°相带	5.5	12.5	2Y				
*JDO$_3$-1801M-	8	120°相带	7	16.5	△	328	230	175	54/44 (斜1)
	4	60°相带	10	20.5	2Y				
	12	120°相带	5	14.3	△				
	6	60°相带	7.5	15.4	2Y				
*JDO$_3$-1802M-	8	120°相带	9	22	△	328	230	250	54/44 (斜1)
	4	60°相带	13	26.5	2Y				
	12	120°相带	6.5	18	△				
	6	60°相带	11	22.3	2Y				
*JDO$_3$-200M-	8	120°相带	12	28.6	△	368	260	260	54/44 (斜3/4)
	4	60°相带	18.5	36.7	2Y				
	12	120°相带	9	25	△				
	6	60°相带	15	29.7	2Y				
*JDO$_3$-225S-	8	120°相带	17	41.4	△	368	250	290	70/58 (斜1.21)
	4	60°相带	25	48	2Y				
	12	120°相带	12	34.5	△				
	6	60°相带	20	37.8	2Y				
*JDO$_3$-250S-	8	120°相带	24	57.7	△	405	275	320	72/58 (斜1.2)
	4	60°相带	36	67.8	2Y				
	12	120°相带	17	44.8	△				
	6	60°相带	28	56	2Y				

注：1. 表中型号上带 * 者，磁密数据为原设计值；不带 * 者磁密数据为根

2. 表中绕组方案一栏内的数字即第九章单绕组多速电动机绕组方案

3. 表中所有电动机的额定电压除特别注明者外均为380伏。

(续表)

跨距	每槽导体数	线规(毫米)	槽满率	功率因数	效率	气隙磁通密度(高斯)	轭部磁通密度(高斯)	齿部磁通密度(高斯)	气隙(毫米)
1-6	78	ϕ0.80	0.745	0.70 0.82	0.70 0.75	7200 4900	10000 13700	16050 10950	0.35
1-4	114	ϕ0.74		0.65 0.74	0.65 0.72	7200 5330	6710 10000	16050 11880	
1-6	60	ϕ0.93	0.75	0.52 0.86	0.72 0.84	6690 4550	9320 12750	14950 10200	0.35
1-4	90	ϕ0.93		0.48 0.77	0.63 0.74	6400 4800	5950 9000	14300 10750	
1-9	38	ϕ1.08	0.76	0.75 0.88	0.705 0.75	4840 3410	9830 13850	13100 9215	0.4
1-6	50	ϕ0.93		0.65 0.88	0.64 0.75	5380 4030	7300 10930	14550 10900	
1-9	30	ϕ1.20	0.73	0.78 0.88	0.72 0.80	4650 3270	9450 13300	12550 8850	0.4
1-6	38	ϕ1.03		0.68 0.86	0.68 0.78	5300 4020	7200 10900	14350 10900	
1-8	26	ϕ1.30	0.783	0.78 0.887	0.825 0.84	7670 5700	12300 16730	15300 10930	0.4
1-6	36	ϕ1.20		0.684 0.888	0.78 0.84	7800 5850	8950 11470	15920 11210	
1-8	18	2×ϕ1.08	0.778	0.758 0.868	0.844 0.858	7750 5760	12420 16900	15450 11040	0.4
1-6	26	2×ϕ1.0		0.697 0.894	0.792 0.844	7560 5650	8670 11100	15430 10850	
1-8	16	2×ϕ1.25	0.756	0.742 0.887	0.858 0.864	7600 5520	11900 16300	14600 10170	0.45
1-6	22	2×ϕ1.16		0.681 0.898	0.826 0.863	7980 5700	8650 11240	15670 10500	
1-11	12	3×ϕ1.35	0.813	0.72 0.889	0.867 0.883	6550 4790	13700 17300	16400 11480	0.5
1-7	18	3×ϕ1.35		0.63 0.90	0.838 0.885	6480 5240	8950 12500	16200 12400	
1-11	10	4×ϕ1.45	0.81	0.72 0.90	0.876 0.89	6500 4770	13100 16650	16250 11350	0.6
1-7	16	3×ϕ1.56		0.673 0.898	0.856 0.891	6220 4880	7920 11250	15400 11500	

据本书公式算得的近似值。
之顺序号。

附录II 常用线规

(一) 漆包圆铜线常用数据表

裸导线标称直径(毫米)	允许公差(毫米)	裸导线截面积(毫米²)	在20°C时的直流电阻计算值(欧/千米)	漆包线最大外径(毫米)		单位长度漆包线的近似重量(公斤/千米)	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
0.020	±0.002	0.00031	55587		0.035		
0.025		0.00049	35574		0.040		
0.030	±0.003	0.00071	24704		0.045		
0.040		0.00126	13920		0.055		
0.050		0.00196	8949	0.065	0.065	0.019	0.022
0.060		0.00283	6198	0.075	0.090	0.027	0.029
0.070		0.00385	4556	0.085	0.100	0.036	0.039
0.080		0.00503	3487	0.095	0.110	0.047	0.050
0.090		0.00636	2758	0.105	0.120	0.059	0.063
0.100	±0.005	0.00785	2237	0.120	0.130	0.073	0.076
0.110		0.00950	1846	0.130	0.140	0.088	0.092
0.120		0.01131	1551	0.140	0.150	0.104	0.108
0.130		0.01327	1322	0.150	0.160	0.122	0.126
0.140		0.01539	1139	0.160	0.170	0.141	0.145
0.150		0.01767	993	0.170	0.190	0.162	0.167

（续表）

裸导线标称直径（毫米）	允许公差（毫米）	裸导线截面积（毫米²）	在20°C时的直流电阻计算值（欧/千米）	漆包线最大外径（毫米）		单位长度漆包线的近似重量（公斤/千米）	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
0.160	±0.005	0.0201	872	0.180	0.200	0.184	0.189
0.170		0.0227	773	0.190	0.210	0.208	0.213
0.180		0.0255	689	0.200	0.220	0.233	0.237
0.190		0.0284	618	0.210	0.230	0.259	0.264
0.200		0.0314	558	0.225	0.240	0.287	0.292
0.210		0.0346	506	0.235	0.250	0.316	0.321
0.230		0.0415	422	0.255	0.280	0.378	0.386
0.250		0.0491	357	0.275	0.300	0.446	0.454
0.27	±0.010	0.0573	306	0.31	0.32	0.522	0.529
0.29		0.0661	265	0.33	0.34	0.601	0.608
0.31		0.0755	232	0.35	0.36	0.689	0.693
0.33		0.0855	205	0.37	0.38	0.780	0.784
0.35		0.0962	182	0.39	0.41	0.876	0.884
0.38		0.1134	155	0.42	0.44	1.03	1.04
0.41		0.1320	133	0.45	0.47	1.20	1.21
0.44		0.1521	115	0.49	0.50	1.38	1.39
0.47		0.1735	101	0.52	0.53	1.57	1.58
0.49		0.1886	93	0.54	0.55	1.71	1.72
0.51		0.204	85.9	0.56	0.58	1.86	1.87
0.53		0.221	79.5	0.58	0.60	2.00	2.02

裸导线标称直径（毫米）	允许公差（毫米）	裸导线截面积（毫米²）	在20°C时的直流电阻计算值（欧/千米）	漆包线最大外径（毫米）		单位长度漆包线的近似重量（公斤/千米）	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
0.55	±0.010	0.238	73.7	0.60	0.62	2.16	2.17
0.57		0.255	68.7	0.62	0.64	2.32	2.34
0.59		0.273	64.1	0.64	0.66	2.48	2.50
0.62		0.302	58.0	0.67	0.69	2.73	2.76
0.64		0.322	54.5	0.69	0.72	2.91	2.94
0.67		0.353	49.7	0.72	0.75	3.19	3.21
0.69		0.374	46.9	0.74	0.77	3.38	3.41
0.72	±0.015	0.407	43.0	0.78	0.80	3.67	3.70
0.74		0.430	40.7	0.80	0.83	3.89	3.92
0.77		0.466	37.6	0.83	0.86	4.21	4.24
0.80		0.503	34.8	0.86	0.89	4.55	4.58
0.83		0.541	32.4	0.89	0.92	4.89	4.92
0.86		0.581	30.1	0.92	0.95	5.25	5.27
0.90		0.636	27.5	0.96	0.99	5.75	5.78
0.93		0.679	25.8	0.99	1.02	6.13	6.16
0.96		0.724	24.2	1.02	1.05	6.53	6.56
1.00		0.785	22.4	1.07	1.11	7.10	7.14
1.04	±0.020	0.850	20.6	1.12	1.15	7.67	7.72
1.08		0.916	19.1	1.16	1.19	8.27	8.32
1.12		0.985	17.8	1.20	1.23	8.89	8.94

（续表）

裸导线标称直径(毫米)	允许公差(毫米)	裸导线截面积(毫米²)	在20°C时的直流电阻计算值(欧/千米)	漆包线最大外径(毫米)		单位长度漆包线的近似重量(公斤/千米)	
				Q	QZ、QQ QY、QXY QQS	Q	QZ、QQ QY、QXY QQS
1.16	±0.020	1.057	16.6	1.24	1.27	9.53	9.59
1.20		1.131	15.5	1.28	1.31	10.2	10.4
1.25		1.227	14.3	1.33	1.36	11.1	11.2
1.30		1.327	13.2	1.38	1.41	12.0	12.1
1.35		1.431	12.3	1.43	1.46	12.9	13.0
1.40		1.539	11.3	1.48	1.51	13.9	14.0
1.45		1.651	10.6	1.53	1.56	14.9	15.0
1.50		1.767	9.93	1.58	1.61	15.9	16.0
1.56		1.911	9.17	1.64	1.67	17.2	17.3
1.62		2.06	8.50	1.71	1.73	18.5	18.6
1.68	±0.025	2.22	7.91	1.77	1.79	19.9	20.0
1.74		2.38	7.37	1.83	1.85	21.4	21.4
1.81		2.57	6.81	1.90	1.93	23.1	23.3
1.88		2.78	6.31	1.97	2.00	25.0	25.2
1.95		2.99	5.87	2.04	2.07	26.8	27.0
2.02		3.21	5.47	2.12	2.14	28.9	29.0
2.10		3.46	5.06	2.20	2.23	31.2	31.3
2.26	±0.030	4.01	4.37	2.36	2.39	36.2	36.3
2.44		4.68	3.75	2.54	2.57	42.1	42.2

铜线直径(毫米)	绝缘线最大外径(毫米)						
	QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
0.05	0.13						
0.06	0.14						
0.07	0.15						
0.08	0.16						
0.09	0.17						
0.10	0.18						
0.11	0.19						
0.12	0.20						
0.13	0.21						
0.14	0.22						
0.15	0.23						
0.16	0.24						
0.17	0.25						
0.18	0.26						
0.19	0.27						
0.20	0.30	0.33		0.31	0.40		
0.21	0.31	0.34		0.32	0.41		
0.23	0.33	0.36		0.34	0.43		
0.25	0.35	0.38		0.36	0.45		
0.27	0.38	0.44		0.40	0.50		

绝缘线重量（公斤/千米）						
QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
0.0329						
0.0423						
0.0531						
0.0653						
0.0790						
0.0932						
0.110						
0.127						
0.147						
0.167						
0.189						
0.212						
0.237						
0.263						
0.290						
0.322	0.335		0.324	0.385		
0.352	0.367		0.355	0.417		
0.417	0.432		0.421	0.485		
0.488	0.504		0.492	0.560		
0.569	0.598		0.581	0.667		

铜线直径(毫米)	绝缘线最大外径(毫米)						
	QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
0.29	0.40	0.46		0.42	0.52		
0.31	0.43	0.48		0.44	0.54		
0.33	0.45	0.50		0.46	0.56		
0.35	0.47	0.52		0.48	0.58		
0.38	0.50	0.56		0.51	0.61		
0.41	0.53	0.59		0.54	0.64		
0.44	0.56	0.62		0.57	0.67		
0.47	0.59	0.65		0.60	0.70		
0.49	0.61	0.67		0.62	0.72		
0.51	0.64	0.69		0.64	0.74		0.75
0.53	0.66	0.71		0.66	0.76		0.79
0.55	0.68	0.73		0.68	0.78		0.81
0.57	0.70	0.75		0.70	0.80		0.83
0.59	0.72	0.77		0.72	0.82		0.85
0.62	0.75	0.80		0.75	0.85		0.88
0.64	0.77	0.82		0.77	0.87		0.90
0.67	0.80	0.85		0.80	0.90		0.93
0.69	0.82	0.87		0.82	0.92		0.95
0.72	0.86	0.92	1.02	0.86	0.96		0.99
0.74	0.88	0.94	1.04	0.88	0.98		1.01

绝缘线重量（公斤/千米）						
QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
0.651	0.682		0.663	0.753		
0.742	0.774		0.751	0.845		
0.836	0.871		0.845	0.942		
0.935	0.971		0.944	1.050		
1.09	1.13		1.11	1.222		
1.27	1.31		1.27	1.395		
1.45	1.50		1.46	1.588		
1.65	1.69		1.66	1.791		
1.79	1.84		1.80	1.939		
1.94	1.99		1.94	2.088		2.476
2.09	2.14		2.09	2.236		2.679
2.25	2.30		2.24	2.395		2.853
2.40	2.46		2.41	2.554		3.033
2.57	2.63		2.57	2.732		3.216
2.83	2.89		2.83	2.923		3.502
3.01	3.07		3.01	3.184		3.701
3.30	3.36		3.29	3.467		4.008
3.49	3.55		3.48	3.636		4.222
3.78	3.85	4.04	3.77	3.959		4.531
4.02	4.08	4.27	3.99	4.187		4.776

铜线直径(毫米)	绝缘线最大外径(毫米)						
	QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
0.77	0.91	0.97	1.07	0.91	1.01		1.04
0.80	0.94	1.00	1.10	0.94	1.04		1.07
0.83	0.97	1.03	1.13	0.97	1.07		1.10
0.86	1.00	1.06	1.16	1.00	1.10		1.13
0.90	1.04	1.10	1.20	1.04	1.14		1.17
0.93	1.07	1.13	1.23	1.07	1.17		1.20
0.96	1.10	1.16	1.26	1.10	1.20		1.23
1.00	1.15	1.23	1.35	1.16	1.29	1.24	1.29
1.04	1.20	1.27	1.39	1.20	1.33	1.28	1.33
1.08	1.24	1.31	1.43	1.24	1.37	1.32	1.37
1.12	1.28	1.35	1.47	1.28	1.41	1.36	1.41
1.16	1.32	1.39	1.51	1.32	1.45	1.40	1.45
1.20	1.36	1.43	1.55	1.36	1.49	1.44	1.49
1.25	1.41	1.48	1.60	1.41	1.54	1.49	1.54
1.30	1.46	1.53	1.65	1.46	1.59	1.54	1.59
1.35	1.51	1.58	1.70	1.51	1.64	1.59	1.64
1.40	1.56	1.63	1.75	1.56	1.69	1.64	1.69
1.45	1.61	1.68	1.80	1.61	1.74	1.69	1.74
1.50	1.68	1.73	1.85	1.66	1.79	1.74	1.80
1.56	1.74	1.79	1.91	1.72	1.85	1.82	1.86

绝缘线重量（公斤/千米）						
QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
4.34	4.41	4.60	4.32	4.520		5.725
4.68	4.75	4.95	4.64	4.863		5.488
5.02	5.09	5.30	5.00	5.216		5.861
5.38	5.46	5.67	5.36	5.569		6.249
5.88	5.96	6.19	5.87	6.097		6.787
6.27	6.36	6.58	6.26	6.489		7.201
6.68	6.76	6.99	6.65	6.902		7.630
7.27	7.39	7.66	7.25	7.510	7.67	8.224
7.83	7.97	8.25	7.83	8.097	8.25	8.337
8.44	8.58	8.86	8.43	8.706	8.85	9.474
9.06	9.21	9.51	9.06	9.348	9.55	10.132
9.71	9.86	10.2	9.71	10.005	10.15	10.815
10.40	10.50	10.9	10.41	10.622	10.85	11.516
11.30	11.50	11.7	11.2	11.546	11.72	12.428
12.20	12.40	12.6	12.2	12.470	12.70	13.373
13.10	13.30	13.6	13.1	13.393	13.59	14.354
14.00	14.30	14.6	14.1	14.415	14.60	15.370
15.00	15.30	15.7	15.1	15.439	15.62	16.419
16.20	16.30	16.7	16.1	16.463	16.80	17.505
17.50	17.60	18.0	17.4	17.790	18.08	18.885

铜线直径(毫米)	绝缘线最大外径(毫米)						
	QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
1.62	1.80	1.85	1.97	1.78	1.91	1.88	1.92
1.68	1.86	1.92	2.04	1.85	1.98	1.95	1.99
1.74	1.92	1.98	2.10	1.91	2.04	2.01	2.05
1.81	1.99	2.05	2.17	1.98	2.11	2.08	2.12
1.88	2.06	2.12	2.24	2.05	2.18		2.19
1.95	2.13	2.19	2.31	2.12	2.25		2.26
2.02	2.20	2.26	2.38	2.19	2.32		2.33
2.10	2.28	2.34	2.46	2.27	2.40		2.41
2.26					2.62		2.62
2.44					2.80		2.80
2.63					2.99		2.99
2.83					3.19		3.19
3.06					3.42		3.42
3.28					3.65		3.65
3.53					3.90		3.90
3.80					4.17		4.17
4.10					4.47		4.47
4.50					4.88		4.88
4.80					5.18		5.18
5.20					5.53		5.53

(续表)

绝 缘 线 重 量 (公斤/千米)						
QST QSR	QM	QME	M	ME	QQSBC	SBEC
18.80	18.90	19.4	18.7	19.118	19.46	20.254
20.20	20.40	20.8	20.1	20.545	20.91	21.797
21.70	21.90	22.2	21.6	21.972	22.37	23.289
23.40	23.60	24.1	23.4	23.807	24.16	25.116
25.20	25.40	25.9	25.2	25.639		27.000
27.10	27.30	27.8	27.0	27.481		28.944
29.10	29.40	29.8	29.0	29.505		30.925
31.40	31.70	32.2	31.4	31.939		33.369
				36.956		38.913
				42.950		45.063
				49.749		52.045
				57.452		59.942
				66.568		69.273
				76.975		79.750
				88.915		91.977
				102.855		106.161
				119.610		123.106
				143.820		147.672
				163.473		167.550
				191.580		196.003

（三）中国线规与近似英规对照表

中国线规		近似英规 (S. W. G.)		中国线规		近似英规 (S. W. G.)	
直径 (毫米)	标称截面 (毫米²)	线号	直径 (毫米)	直径 (毫米)	标称截面 (毫米²)	线号	直径 (毫米)
0.05	0.00196	47	0.0508	0.31	0.0755	30	0.315
0.06	0.00283	46	0.0610	0.33	0.0855		
0.07	0.00385	45	0.0711	0.35	0.0962	29	0.345
0.08	0.00503	44	0.0813	0.38	0.1134	28	0.376
0.09	0.00636	43	0.0914	0.41	0.1320	27	0.417
0.10	0.00785	42	0.102	0.44	0.1521	26	0.457
0.11	0.00950	41	0.112	0.47	0.1735		
0.12	0.01131	40	0.122	0.49	0.1886		
0.13	0.01327	39	0.132	0.51	0.204	25	0.508
0.14	0.01539			0.53	0.221		
0.15	0.01767	38	0.152	0.55	0.238	24	0.559
0.16	0.0201			0.57	0.255		
0.17	0.0227	37	0.173	0.59	0.273	23	0.610
0.18	0.0255			0.62	0.302		
0.19	0.0284	36	0.193	0.64	0.322		
0.20	0.0314			0.67	0.353		
0.21	0.0346	35	0.213	0.69	0.374	22	0.712
0.23	0.0415	34	0.234	0.72	0.407		
0.25	0.0491	33	0.254	0.74	0.430		
0.27	0.0573	32	0.274	0.77	0.466		
0.29	0.0661	31	0.295	0.80	0.503	21	0.813

(续表)

中国线规		近似英规 (S. W. G.)		中国线规		近似英规 (S. W. G.)	
直径 (毫米)	标称截面 (毫米²)	线号	直径 (毫米)	直径 (毫米)	标称截面 (毫米²)	线号	直径 (毫米)
0.83	0.541	21	0.813	1.81	2.57	15	1.829
0.86	0.581			1.88	2.78		
0.90	0.636	20	0.914	1.95	2.99		
0.93	0.679			2.02	3.21	14	2.032
0.96	0.724			2.10	3.46		
1.00	0.785	19	1.016	2.26	4.01	13	2.337
1.04	0.850			2.44	4.68		
1.08	0.916			2.63	5.43	12	2.642
1.12	0.985			2.83	6.29	11	2.946
1.16	1.057			3.05	7.31	10	3.251
1.20	1.131	18	1.219	3.28	8.45		
1.25	1.227			3.53	9.79	9	3.658
1.30	1.327			3.8	11.34	8	4.064
1.35	1.431			4.1	13.2		
1.40	1.539	17	1.422	4.5	15.9	7	4.470
1.45	1.651			4.8	18.1	6	4.877
1.50	1.767			5.2	21.24		
1.56	1.911			5.5	23.76	4	5.893
1.62	2.06	16	1.626	6.0	28.3		
1.68	2.22			6.5	33.2	3	6.401
1.74	2.38			7.0	38.5	2	7.010

（四）漆包线和纤维绕包铜线的型号和名称

型　　号	名　　称
Q	油基性漆包圆铜线
QQ	高强度聚乙烯醇缩醛漆包圆铜线
QZ	高强度聚酯漆包圆铜线
QST	单丝(天然丝)漆包线
QSR	单人丝(人造丝)漆包线
QM	单纱漆包线
QME	双纱漆包线
M	单纱包圆线
ME	双纱包圆线
QQSBC	单玻璃丝包高强度漆包圆铜线
SBEC	双玻璃丝包圆铜线
QY	耐高温聚酰亚胺漆包圆铜线
QXY	耐高温聚酰胺-亚胺漆包圆铜线
QQS	彩色高强度聚乙烯醇缩醛漆包圆铜线

附录 III 三角函数正弦余弦表

正 弦

α	0′	6′	12′	18′	24′	30′	36′	42′	48′	54′	60′		1′	2′	3′
											0.0000	90°			
0°	0.0000	0017	0035	0052	0070	0087	0105	0122	0140	0157	0175	89°	3	6	9
1°	0175	0192	0209	0227	0244	0262	0279	0297	0314	0332	0349	88°	3	6	9
2°	0349	0366	0384	0401	0419	0436	0454	0471	0488	0506	0523	87°	3	6	9
3°	0523	0541	0558	0576	0593	0610	0628	0645	0663	0680	0698	86°	3	6	9
4°	0698	0715	0732	0750	0767	0785	0802	0819	0837	0854	0.0872	85°	3	6	9
5°	0.0872	0889	0906	0924	0941	0958	0976	0993	1011	1028	1045	84°	3	6	9
6°	1045	1063	1080	1097	1115	1132	1149	1167	1184	1201	1219	83°	3	6	9
7°	1219	1236	1253	1271	1288	1305	1323	1340	1357	1374	1392	82°	3	6	9
8°	1392	1409	1426	1444	1461	1478	1495	1513	1530	1547	1564	81°	3	6	9
9°	1564	1582	1599	1616	1633	1650	1668	1685	1702	1719	0.1736	80°	3	6	9
10°	0.1736	1754	1771	1788	1805	1822	1840	1857	1874	1891	1908	79°	3	6	9
11°	1908	1925	1942	1959	1977	1994	2011	2028	2045	2062	2079	78°	3	6	9
12°	2079	2096	2113	2130	2147	2164	2181	2198	2215	2233	2250	77°	3	6	9
13°	2250	2267	2284	2300	2317	2334	2351	2368	2385	2402	2419	76°	3	6	8
14°	2419	2436	2453	2470	2487	2504	2521	2538	2554	2571	0.2588	75°	3	6	8
15°	0.2588	2605	2622	2639	2656	2672	2689	2706	2723	2740	2756	74°	3	6	8
16°	2756	2773	2790	2807	2823	2840	2857	2874	2890	2907	2924	73°	3	6	8
17°	2924	2940	2957	2974	2990	3007	3024	3040	3057	3074	3090	72°	3	6	8
18°	3090	3107	3123	3140	3156	3173	3190	3206	3223	3239	3256	71°	3	6	8
19°	3256	3272	3289	3305	3322	3338	3355	3371	3387	3404	0.3420	70°	3	5	8
20°	0.3420	3437	3453	3469	3486	3502	3518	3535	3551	3567	3584	69°	3	5	8
21°	3584	3600	3616	3633	3649	3665	3681	3697	3714	3730	3746	68°	3	5	8
22°	3746	3762	3778	3795	3811	3827	3843	3859	3875	3891	3907	67°	3	5	8
23°	3907	3923	3939	3955	3971	3987	4003	4019	4035	4051	4067	66°	3	5	8
24°	4067	4083	4099	4115	4131	4147	4163	4179	4195	4210	0.4226	65°	3	5	8
25°	0.4226	4242	4258	4274	4289	4305	4321	4337	4352	4368	4384	64°	3	5	8
26°	4384	4399	4415	4431	4446	4462	4478	4493	4509	4524	4540	63°	3	5	8
27°	4540	4555	4571	4586	4602	4617	4633	4648	4664	4679	4695	62°	3	5	8
28°	4695	4710	4726	4741	4756	4772	4787	4802	4818	4833	4848	61°	3	5	8
29°	4848	4863	4879	4894	4909	4924	4939	4955	4970	4985	0.5000	60°	3	5	8
30°	0.5000	5015	5030	5045	5060	5075	5090	5105	5120	5135	5150	59°	3	5	8
31°	5150	5165	5180	5195	5210	5225	5240	5255	5270	5284	5299	58°	2	5	7
32°	5299	5314	5329	5344	5358	5373	5388	5402	5417	5432	5446	57°	2	5	7
33°	5446	5461	5476	5490	5505	5519	5534	5548	5563	5577	5592	56°	2	5	7
34°	5592	5606	5621	5635	5650	5664	5678	5693	5707	5721	0.5736	55°	2	5	7
35°	0.5736	5750	5764	5779	5793	5807	5821	5835	5850	5864	5878	54°	2	5	7
36°	5878	5892	5906	5920	5934	5948	5962	5976	5990	6004	6018	53°	2	5	7
37°	6018	6032	6046	6060	6074	6088	6101	6115	6129	6143	6157	52°	2	5	7
38°	6157	6170	6184	6198	6211	6225	6239	6252	6266	6280	6293	51°	2	5	7
39°	6293	6307	6320	6334	6347	6361	6374	6388	6401	6414	0.6428	50°	2	4	7
40°	0.6428	6441	6455	6468	6481	6494	6508	6521	6534	6547	6561	49°	2	4	7
41°	6561	6574	6587	6600	6613	6626	6639	6652	6665	6678	6691	48°	2	4	7
42°	6691	6704	6717	6730	6743	6756	6769	6782	6794	6807	6820	47°	2	4	6
43°	6820	6833	6845	6858	6871	6884	6896	6909	6921	6934	6947	46°	2	4	6
44°	6947	6959	6972	6984	6997	7009	7022	7034	7046	7059	0.7071	45°	2	4	6
	60′	54′	48′	42′	36′	30′	24′	18′	12′	6′	0′	α	1′	2′	3′

余 弦

正弦

α	0′	6′	12′	18′	24′	30′	36′	42′	48′	54′	60′		1′	2′	3′
45°	0.7071	7083	7096	7108	7120	7133	7145	7157	7169	7181	7193	44°	2	4	6
46°	7193	7206	7218	7230	7242	7254	7266	7278	7290	7302	7314	43°	2	4	6
47°	7314	7325	7337	7349	7361	7373	7385	7396	7408	7420	7431	42°	2	4	6
48°	7431	7443	7455	7466	7478	7490	7501	7513	7524	7536	7547	41°	2	4	6
49°	7547	7559	7570	7581	7593	7604	7615	7627	7638	7649	0.7660	40°	2	4	6
50°	0.7660	7672	7683	7694	7705	7716	7727	7738	7749	7760	7771	39°	2	4	6
51°	7771	7782	7793	7804	7815	7826	7837	7848	7859	7869	7880	38°	2	4	5
52°	7880	7891	7902	7912	7923	7934	7944	7955	7965	7976	7986	37°	2	4	5
53°	7986	7997	8007	8018	8028	8039	8049	8059	8070	8080	8090	36°	2	3	5
54°	8090	8100	8111	8121	8131	8141	8151	8161	8171	8181	0.8192	35°	2	3	5
55°	0.8192	8202	8211	8221	8231	8241	8251	8261	8271	8281	8290	34°	2	3	5
56°	8290	8300	8310	8320	8329	8339	8348	8358	8368	8377	8387	33°	2	3	5
57°	8387	8396	8406	8415	8425	8434	8443	8453	8462	8471	8480	32°	2	3	5
58°	8480	8490	8499	8508	8517	8526	8536	8545	8554	8563	8572	31°	2	3	5
59°	8572	8581	8590	8599	8607	8616	8625	8634	8643	8652	0.8660	30°	1	3	4
60°	0.8660	8669	8678	8686	8695	8704	8712	8721	8729	8738	8746	29°	1	3	4
61°	8746	8755	8763	8771	8780	8788	8796	8805	8813	8821	8829	28°	1	3	4
62°	8829	8838	8846	8854	8862	8870	8878	8886	8894	8902	8910	27°	1	3	4
63°	8910	8918	8926	8934	8942	8949	8957	8965	8973	8980	8988	26°	1	3	4
64°	8988	8996	9003	9011	9018	9026	9033	9041	9048	9056	0.9063	25°	1	3	4
65°	0.9063	9070	9078	9085	9092	9100	9107	9114	9121	9128	9135	24°	1	2	4
66°	9135	9143	9150	9157	9164	9171	9178	9184	9191	9198	9205	23°	1	2	3
67°	9205	9212	9219	9225	9232	9239	9245	9252	9259	9265	9272	22°	1	2	3
68°	9272	9278	9285	9291	9298	9304	9311	9317	9323	9330	9336	21°	1	2	3
69°	9336	9342	9348	9354	9361	9367	9373	9379	9385	9391	0.9397	20°	1	2	3
70°	0.9397	9403	9409	9415	9421	9426	9432	9438	9444	9449	9455	19°	1	2	3
71°	9455	9461	9466	9472	9478	9483	9489	9494	9500	9505	9511	18°	1	2	3
72°	9511	9516	9521	9527	9532	9537	9542	9548	9553	9558	9563	17°	1	2	3
73°	9563	9568	9573	9578	9583	9588	9593	9598	9603	9608	9613	16°	1	2	2
74°	9613	9617	9622	9627	9632	9636	9641	9646	9650	9655	0.9659	15°	1	2	2
75°	0.9659	9664	9668	9673	9677	9681	9686	9690	9694	9699	9703	14°	1	1	2
76°	9703	9707	9711	9715	9720	9724	9728	9732	9736	9740	9744	13°	1	1	2
77°	9744	9748	9751	9755	9759	9763	9767	9770	9774	9778	9781	12°	1	1	2
78°	9781	9785	9789	9792	9796	9799	9803	9806	9810	9813	9816	11°	1	1	2
79°	9816	9820	9823	9826	9829	9833	9836	9839	9842	9845	0.9848	10°	1	1	2
80°	0.9848	9851	9854	9857	9860	9863	9866	9869	9871	9874	9877	9°	0	1	1
81°	9877	9880	9882	9885	9888	9890	9893	9895	9898	9900	9903	8°	0	1	1
82°	9903	9905	9907	9910	9912	9914	9917	9919	9921	9923	9925	7°	0	1	1
83°	9925	9928	9930	9932	9934	9936	9938	9940	9942	9943	9945	6°	0	1	1
84°	9945	9947	9949	9951	9952	9954	9956	9957	9959	9960	0.9962	5°	0	1	1
85°	0.9962	9963	9965	9966	9968	9969	9971	9972	9973	9974	9976	4°	0	0	1
86°	9976	9977	9978	9979	9980	9981	9982	9983	9984	9985	9986	3°	0	0	0
87°	9986	9987	9988	9989	9990	9990	9991	9992	9993	9993	9994	2°	0	0	0
88°	9994	9995	9995	9996	9996	9997	9997	9997	9998	9998	0.9998	1°	0	0	0
89°	9998	9999	9999	9999	9999	0000	0000	0000	0000	0000	1.0000	0°	0	0	0
90°	1.0000														
	60′	54′	48′	42′	36′	30′	24′	18′	12′	6′	0′	α	1′	2′	3′

余弦

本表是从 0° 到 90° 每差 6′ 各角的正弦(它们的余角的余弦)表。表中标有 A 的左边、右边两直行和顶上、底下两横行分别是角的度数和分数: 左边第一直行和顶上第一横行是查正弦用的(表中 89° 横行中 30′ 到 60′ 的函数值下面划有横线,表示它的整数部分与下一横行相同,是 1 不是 0); 右边第四直行和底下第一横行是查余弦用的。表的后一栏(右边三直行)是修正值。例如: 查 sin70°32″, 先查到 70°, 横着向右查到顶上标有 30′ (小 2′) 的直行得 0.9426, 再向右查到后一栏标有 2′ 的直行得 2, 这是 0.0002, 所以 $\sin 70°32' = 0.9426 + 0.0002 = 0.9428$。又如: 查 sin 70°34′, 先查出 70°, 横着向右到顶上标有 36′ (大 2′) 的直行得 0.9432, 再向右查到后一栏标有 2′ 的直行得 2, 这是 0.0002, 所以 $\sin 70°34' = 0.9432 - 0.0002 = 0.9430$。又如: 查 cos 18°39′, 先由表中右边标有 A 的直行查出 18°, 横着向左查到底下标有 36′ (小 3′) 的直行得 0.9478 或标有 42′ (大 3′) 的直行得 0.9472, 再向右查到后一栏标有 3′ 的直行得 3, 这是 0.0003, 所以 $\cos 18°39' = 0.9478 - 0.0003 = 0.9475$ 或 $0.9472 + 0.0003 = 0.9475$。